

**И.Т. Глебов**

**ФИЗИКА ДРЕВЕСИНЫ**

Учебное пособие

Екатеринбург  
2018

УДК 674.02.(075.8)

**Глебов И.Т.**

Физика древесины: Учебное пособие. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2018.  
– 80 с.

Рассмотрены строение древесины, ее макроструктура, породы. Показаны механические свойства: плотность, прочность при сжатии, растяжении, скалывании, твердость, а также силы трения, коэффициенты трения скольжения и качения. Приведены значения модулей упругости. Показано влияние влажности на свойства древесины – гигроскопичность, покоробленность, водопоглощение, разбухание и на деформации.

Рассмотрены свойства древесины базирующиеся на законы физики: тепловые и электрические свойства древесины, акустические свойства, термосопротивление и паропроницаемость древесины, оптические свойства.

Учебное пособие предназначено для студентов лесотехнических вузов, бакалавров, магистров, аспирантов

Ил. 24, табл. 18. Библиогр.: 15 назв.

УДК 674.02.(075.8)

#### Рецензенты

*О.А. РУБЛЕВА* – канд. техн. наук, доцент кафедры машин и технологии деревообработки ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет»

*П.С. ВЛАСОВ* – генеральный директор ЗАО «УРАЛГИПРОЛЕСПРОМ»

ISBN

© И.Т. Глебов, 2018

©

## Введение

Древесина – материал растительного происхождения, непрерывно возобновляемый в природе, который с древних времен используется в разнообразных отраслях человеческой деятельности. Применительно к условиям ее использования, древесина обладает множеством достоинств и недостатков. Причем в одних условиях некоторое свойство древесины считается достоинством, а в других – недостатком [1].

Например, древесина обладает анизотропными свойствами, т.е. различными показателями свойств по направлениям радиальному, тангентальному и продольному. Если дело касается прочности, то показатели напряжений растяжения, сжатия и упругости максимальны для продольного направления. В то же время наибольшее значение показателя термосопротивления получается для поперечного направления, в два раза больше, чем для продольного.

Прочность древесины резко понижается при наличии в ней пороков, например, сучков, косослоя, свилеватости, но если древесина используется как отделочный материал, то указанные пороки обогащают текстуру древесины и повышают ценность этого материала.

Повышенное содержание влаги в древесине понижает ее прочность, но повышает пластичность материала и создает благоприятные предпосылки для выполнения механических технологических операций, например гнутья, срезания тонкого шпона, понижения мощности при резании.

Древесина горит, материал пожароопасный. Это свойство используется в энергетике, издавна дрова использовались для отопления жилых помещений, для приготовления пищи.

Изменчивость свойств древесины определяется большим разнообразием пород древесины, условиями произростания, влажностью, неоднородностью строения древесины.

Для изучения подобных изменчивых свойств древесины и осознанного использования ее в различных отраслях промышленности и строительства в вузах страны введена учебная дисциплина «Физика древесины», позволяющая описывать свойства древесины, базируясь

на фундаментальные законы физики, например, в области теплопроводности, электропроводности, отражения света, проводимости звука и др. На базе таких знаний создаются наукоемкие технологии переработки древесины.

## 1. Строение древесины

### 1.1. Эволюционное развитие деревьев

Современные деревья прошли сложный эволюционный путь развития на суше. Они выработали для существования сложные приспособления, такие, как проводящие ткани для подъема воды от корней к листьям, покровные ткани, защищающие дерево от высыхания, механических тканей, удерживающих дерево в вертикальном положении.

В конкурентной борьбе за солнечную энергию деревья стремились подняться вверх. Самые крупные деревья в мире, секвойя вечнозеленая в возрасте 2500...3500 лет достигает высоты более 110 м при диаметре основания 10 м.

Ель, произрастающая в Ленинградской области, имеет диаметр 60 см и высоту 38 м. Лиственница сибирская при диаметре ствола 1,8 м достигает высоты 45 м. Считается, что высота дерева ограничивается его способностью поднимать воду.

### 1.2. Дерево

Дерево – это многолетнее растение с корнями, одревесневшим стволом, сохраняющимся в течение всей его жизни, и ветвями, образующими крону, высотой от 2 до 100 м, с продолжительностью жизни до 3,5 тыс. лет (рис. 1). При жизни каждая часть дерева выполняет свою определенную функцию, а в срубленном дереве имеет различное промышленное применение.

**Крона** состоит из ветвей и листьев или хвои. Из углекислоты, поглощаемой из воздуха, и воды, получаемой из почвы, в листьях образуются сложные органические вещества, необходимые для жизни

дерева. Размеры кроны зависят от положения дерева в лесу и конкуренции с соседними деревьями и влияют на количество древесины образующейся в стволе.

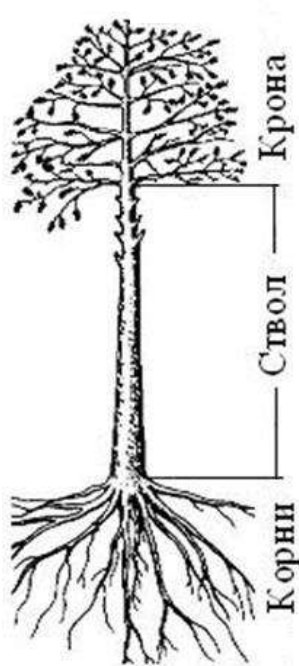


Рис. 1. Дерево

Форма кроны зависит от угла прикрепления ветвей к стволу дерева. В среднем угол прикрепления для березы составляет  $30^\circ$ , осины  $50^\circ$ , сосны  $90^\circ$ , ели  $120^\circ$ .

Промышленное использование кроны невелико. Из листьев (хвои) получают лекарственные препараты и витаминную муку – ценный продукт для животноводства и птицеводства. Из ветвей делают технологическую щепу для производства тарного картона и древесноволокнистых плит.

**Ствол** – это часть дерева от корней до вершины, несущая на себе ветви. Ствол состоит из следующих элементов: коры (рис. 2), включающей корку и луб, камбия, древесины, которая может включать заболонь, спелую древесину и ядро, и сердцевины.

Ствол растущего дерева проводит воду с растворенными минеральными веществами вверх (восходящий поток), а с органическими веществами – вниз по ткани лубу к корням (нисходящий ток). Ствол хранит запас питательных вещества, служит для размещения и поддержания кроны. Он дает основную массу древесины и имеет главное

промышленное значение. Верхняя тонкая часть ствола называется вершиной, нижняя толстая часть – комлем.

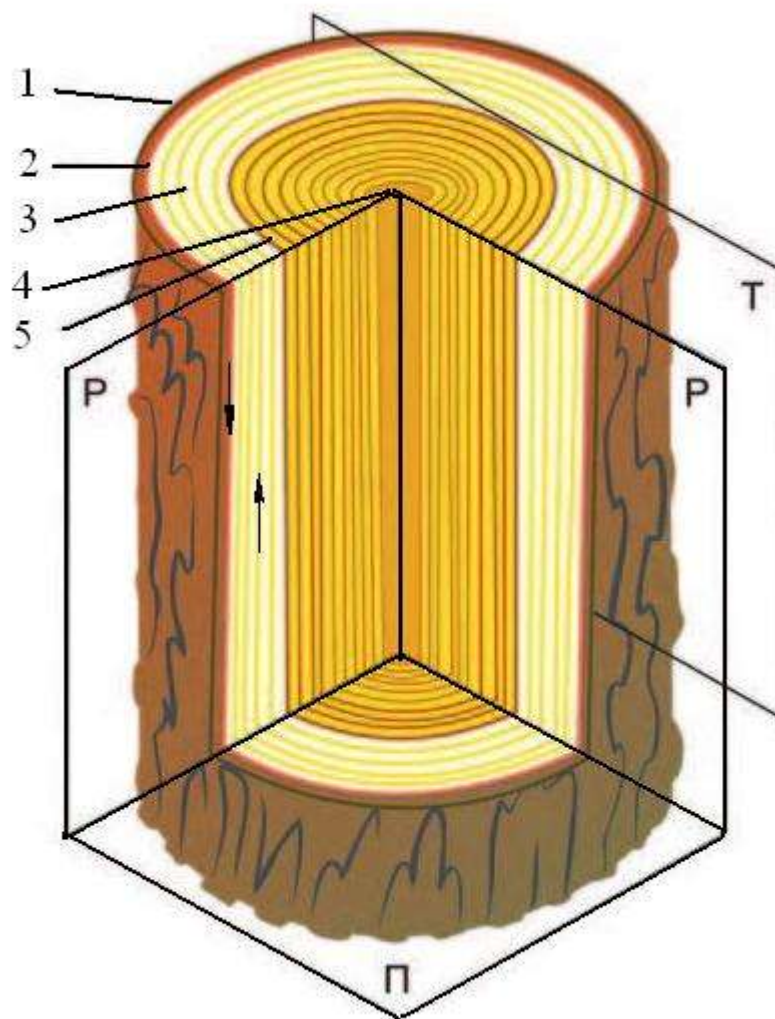


Рис. 2. Элементы ствола дерева:

1 – кора; 2 – камбий; 3 – заболонь; 4 – сердцевина; 5 – ядро;  
плоскости разреза: Р – радиальная; Т – тангентальная;  
П – поперечная

В процессе роста в дереве происходит нарастание конусообразных слоев древесины. Каждый последующий конус имеет большую высоту и диаметр основания.

**Корни** проводят воду с растворенными в ней минеральными веществами вверх по стволу, хранят запасы питательных веществ и удерживают дерево в вертикальном положении. Корни используются как второсортное топливо. Пни и крупные корни сосны через некото-

рое время после валки деревьев служат сырьем для получения канифоли и скипидара.

В общем объеме дерева объем ствола составляет 55-90%, кроны – 5-20% и корней – 5-25%.

### **1.3. Строение древесины**

Все живое на земле состоит из клеток. Растущее дерево – организм, и потому основным его структурным элементом является клетка. Клетка – это полость, окруженная стенками. Полости клеток позволяют накапливать и передавать водные растворы питательных веществ различным частям дерева, а стенки обеспечивают механическую прочность дерева.

В стволе дерева клетки не однородны по форме и размерам. Их группы-ткани специализированы. Различают паранхиму, сосуды, сердцевинные лучи, трахеиды, либриформ, смоляные ходы. Механическое сопротивление воздействию внешних нагрузок оказывают главным образом механические ткани – трахеиды (у хвойных пород) и либриформ (у лиственных пород древесины), составляющие основную массу древесины.

В состав древесины входят отмершие (одеревеневшие) клетки, расположенные в центральной части ствола, ветвей, корней растущего дерева, и периферийный луб, состоящий из живых клеток. По центральной части древесины из почвы к листьям поднимается вверх вода с растворёнными в ней веществами, а по лубу спускается вниз образовательный сок, питающий живые клетки луба. Одеревенение клеточных оболочек происходит при пропитывании их оболочек лигнином. Одеревеневшие оболочки клеток становятся более крепкими, твёрдыми и упругими.

Таким образом, под древесиной понимают совокупность проводящих, механических и запасяющих тканей, расположенных в стволах, ветвях и корнях древесных растений между корой и сердцевиной. Древесина – материал биологического происхождения, состоящий на 99% из высокомолекулярных соединений с включением неорганических веществ.

Древесина – материал неоднородного строения. Эта неоднородность является результатом роста дерева. Каждый год происходит нарастание новых слоев клеток ранней (весенней) и поздней (летней) древесины, которые образуют годичные слои.

**Главные направления ствола дерева.** Физико-механические свойства ствола дерева различны в трех взаимно перпендикулярных направлениях: поперечном, радиальном и тангенциальном (рис. 3).

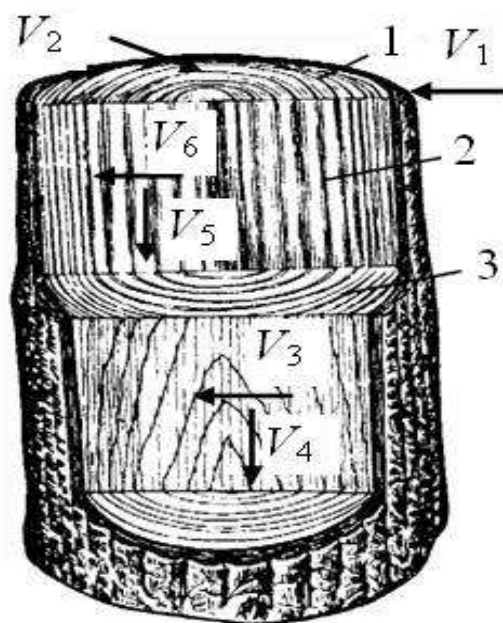


Рис. 3. Разрезы ствола:

1 – поперечный (торцовый); 2 – радиальный; 3 – тангенциальный

*Поперечным* называется разрез, проходящий перпендикулярно оси ствола и направлению волокон. Он образует торцовую плоскость и образуется при перерезании ствола в направлениях  $V_1$  и  $V_2$ .

*Радиальный разрез* – это продольный разрез, проходящий через сердцевину по радиусу ствола, образованный при срезании по направлениям  $V_5$  или  $V_6$ . Сердцевина расположена примерно в центре ствола и на радиальном разрезе видна в виде узкой темной полосы.

*Тангенциальный (тангентальный) разрез* – это продольный разрез, проходящий на некотором расстоянии от сердцевины касательно



к годичному слою. Образуется при срезании слоя по направлениям  $V_3$  и  $V_4$ .

Древесина в указанных разрезах значительно отличается по своему строению. Поперечный разрез образован перерезанием трахеидов (волокон хвойных пород) и волокон либриформа и сосудов (у лиственных пород) нормально к их длине. Тангенциальный разрез получен перерезанием смоляных ходов и сердцевинных лучей нормально к их длине и частичным перерезанием волокон и сосудов параллельно их оси. Радиальный разрез образован перерезанием волокон и сосудов параллельно их длине.

Механические свойства древесины по главным направлениям различны. Это свойство называют ортотропией. Механические свойства древесины различны и в промежуточных направлениях. Это свойство материала называют анизотропией. Таким образом, древесина – анизотропно-ортотропный материал волокнисто-слоистого, разноклеточного строения с пустотами.

## 1.4. Макроструктура древесины

Под макроструктурой понимают строение древесины, которое можно исследовать невооруженным глазом или с помощью лупы. К элементам макроструктуры относят слои прироста (годичные слои), сердцевинные лучи, заболонь, ядро, спелую древесину, сосуды, смоляные ходы.

**Годичные слои** – слои древесины, образовавшиеся в течение одного года. Наблюдаются в виде кольца и состоят из ранней (светлой части кольца), и поздней древесины (темной части кольца).

На поперечном разрезе ствола дерева годичные слои образуют концентрические окружности (рис. 4). На радиальном разрезе, плоскость которого проходит параллельно продольной оси ствола дерева и совпадает с радиусом, годичные слои образуют прямые параллельные полосы. На тангенциальном разрезе, плоскость которого проходит параллельно продольной оси ствола на некотором расстоянии от сердцевинной трубки, годичные слои образуют извилистые и V-образные полосы.

Годичный слой состоит из ранней невызревшей и поздней вызревшей зон, нарастающих соответственно в начале и конце вегета-

ционного периода. Ранняя зона древесины светлая, мягкая и рыхлая, поздняя зона древесины – более темная, плотная и твердая.

С увеличением ширины годовичных слоев хвойных пород древесины плотность и прочность древесины уменьшаются.

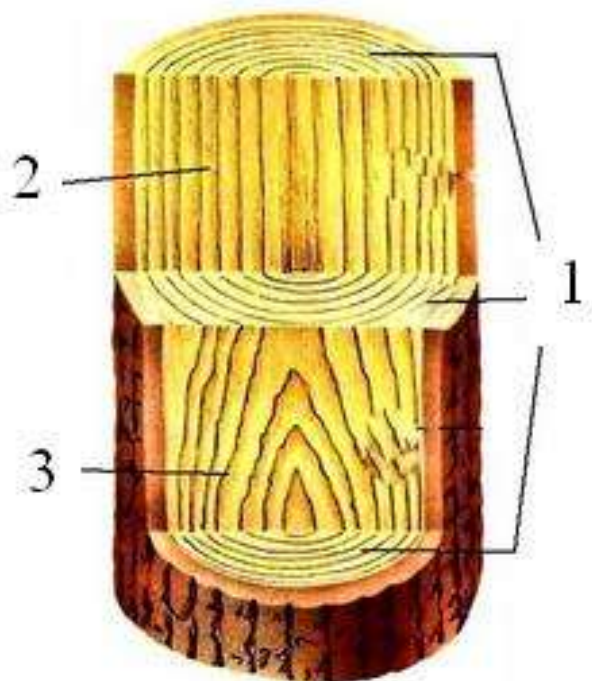


Рис. 4. Годовые слои на разрезах ствола дерева:  
1 – поперечный (торцовый); 2 – радиальный; 3 – тангенциальный

Ширина годовичных слоев, в зависимости от условий роста дерева, изменяется от долей миллиметра до 2...3 см. Оптимальная ширина годовичных слоев древесины хвойных пород, используемых в строительстве, производстве пиломатериалов (досок, брусев и др.), мебели должна быть не более 3,5...4,0 мм. Такая древесина обладает достаточной прочностью, допустимой для указанных отраслей промышленности.

Таким образом, для выбора древесины необходимой прочности надо знать объем поздней древесины в годовичном слое (рис. 5).

Содержание поздней древесины вычисляют в процентах с точностью до 1% по формуле

$$m = \frac{\sum \delta}{l} 100,$$

где  $\delta$  – толщина отдельного слоя поздней древесины, мм;

$l$  – расстояние между 5...10 годовыми кольцами, мм.

**Сердцевинные лучи.** Тонкие блестящие линии, расходящиеся на торцовом срезе от сердцевины к коре по радиусам, которые служат для проведения воды и питательных веществ в горизонтальном направлении и для хранения запасных питательных веществ. Ширина *сердцевинных лучей* 0,005–1 мм. Широкие лучи имеют дуб и бук. Сердцевинные лучи занимают до 32% объема древесины лиственных пород и до 5-8% – хвойных пород.

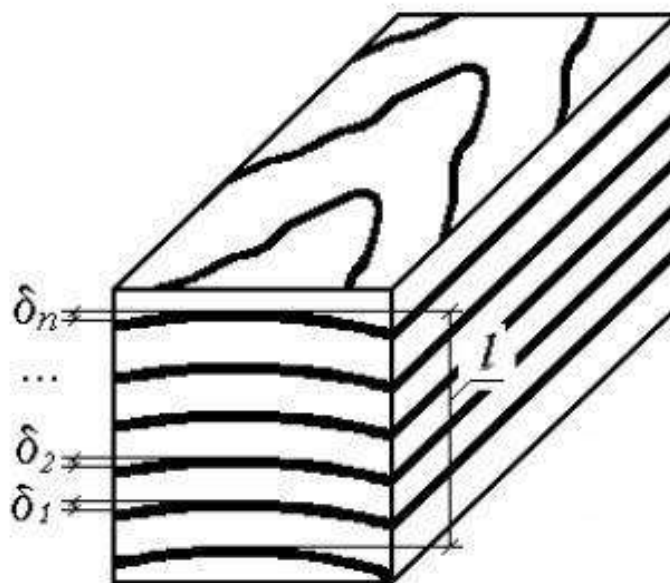


Рис. 5. Схема измерения размеров:

$l$  – расстояния между крайними годовыми слоями,  $l \approx 20$  мм;

$\delta$  – ширины зоны поздней древесины годового слоя

**Смоляные ходы.** Узкие, длинные, заполненные смолой межклеточные каналы, пронизывающие древесину в вертикальном и горизонтальном направлениях в древесине хвойных пород. Вертикальные каналы расположены преимущественно в поздней зоне годичных слоев, имеют ширину 0,08-0,14 мм и длину 10- 80 см. Горизонтальные смоляные ходы тоньше, но их очень много – до 300 штук на 1 см<sup>2</sup> площади сечения ствола. Максимальное количество смоляных ходов наблюдается в древесине сосны, затем у кедра, лиственницы, ели.

**Ядро.** Темноокрашенная центральная зона ствола, имеющая меньшую влажность, чем периферийная. Различают настоящее ядро древесины, которое представляет собой темно-окрашенное ядро и встречается у древесных пород с регулярным ядрообразованием. Ядровые породы – сосна, лиственница, дуб, ясень, грецкий орех, тополь,

рябина и др. Ядро может быть ложным. Ложное ядро древесины – темно-окрашенное ядро у древесных пород с нерегулярным ядрообразованием (ель, береза, бук, клен и др.).

**Заболонь** древесины – наружная, большей частью светлоокрашенная зона древесины стволов и ветвей, физиологически активная в растущем дереве (рис. 6).

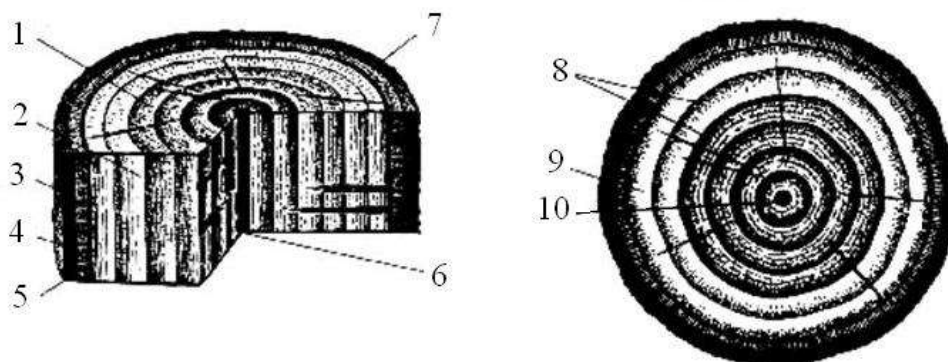


Рис. 6. Разрезы ствола дерева с элементами макроструктуры:  
1 – торцовый разрез; 2 – тангенциальный разрез; 3 – пробковый слой;  
4 – лубяной слой; 5 – камбий; 6 – сердцевина; 7 – радиальный разрез;  
8 – годовые кольца; 9 – заболонь; 10 – ядро

**Кора** состоит из двух слоев: наружного – пробкового слоя и внутреннего – лубяного слоя. По лубяному слою выработанные в листьях продукты фотосинтеза поступают к корням. Наружный слой служит для защиты дерева от внешних воздействий.

**Спелая древесина.** Центральная зона ствола, имеющая меньшую влажность, чем периферийная, а по цвету не отличающаяся от нее.

**Ядровые породы.** Породы, имеющие темноокрашенную центральную зону меньшей влажности, чем периферийная древесина.

**Безъядровые породы.** Породы с однородной окраской древесины ствола.

**Спелодревесные породы.** Породы, у которых центральная зона ствола имеет меньшую влажность, чем периферийная, а по цвету не отличается от нее.

**Заболонные породы.** Породы, у которых центральная зона ствола не отличается от периферийной ни по цвету, ни по содержанию влаги.

**Сосуды** – элементы структуры, имеющие форму трубок, расположенных в древесине только лиственных пород. По сосудам из кор-

ней в крону поднимается вода с питательными веществами. Ширина крупных сосудов изменяется в пределах 0,2- 0,4 мм, мелких сосудов – 0,016 - 0,1 мм. Длина сосудов достигает 10 см. По расположению сосудов в годичном слое различают породы кольцесосудистые и рассеянно-сосудистые. У кольцесосудистых пород (дуб, ясень и др.) крупные сосуды расположены в ранней зоне годичного слоя, а мелкие – в поздней зоне. У рассеянно-сосудистых пород крупные (хурма и др.) или мелкие (береза, осина и др.) сосуды равномерно распределены по годичному слою.

**Крупные сосуды.** Сосуды, видимые невооруженным глазом на торцовом срезе, диаметром более 0,2 мм.

**Мелкие сосуды.** Сосуды, не видимые невооруженным глазом на торцовом срезе, диаметром менее 0,2 мм.

**Кольцесосудистые породы.** Породы, у которых имеются крупные сосуды, располагающиеся в ранних зонах годичных слоев, и мелкие сосуды, располагающиеся в поздних зонах годичных слоев.

**Рассеянно-сосудистые породы.** Породы, у которых мелкие сосуды равномерно разбросаны по всей ширине годичного слоя.

## 1.5. Породы древесины

**Хвойные породы.** В древесине из-за разницы в цвете между ранней и поздней зоной годичных слоев слои хорошо заметны на всех срезах. Ранняя древесина более рыхлая и светлая, а поздняя более темная и плотная. Сердцевинные лучи узкие, почти незаметные на всех срезах. У некоторых пород имеются смоляные ходы, видимые на продольных срезах в виде темных продольных штрихов [2].

**Лиственные кольцесосудистые породы.** Годичные слои хорошо заметны на всех срезах. Крупные сосуды группируются в ранней зоне, образуя сплошное пористое кольцо, а мелкие сосуды сосредоточены в поздней зоне и образуют там различные рисунки в виде точек, черточек, волнистых линий или язычков пламени. Крупные сосуды на продольных срезах имеют вид длинных глубоких бороздок, придающих поверхности шероховатость. У некоторых пород хорошо заметны сердцевинные лучи. Все породы ядровые.

**Лиственные рассеянно-сосудистые породы.** Годичные слои едва заметны на всех срезах вследствие однородности строения и окраски ранней и поздней зон годичного слоя. Сосуды равномерно распределены по всей ширине годичного слоя. Переход от ранней зоны к поздней плавный, незаметный. Сердцевинные лучи очень узкие или

узкие. Породы ядровые, спелодревесные и заболонные. Часто встречается ложное ядро.

**Лиственница.** Ядровая порода. Ядро красновато-бурого цвета. Годичные слои отлично видны на всех срезах. Ранняя древесина имеет серо-зеленоватый цвет. Поздняя древесина темно-бурая. Имеются многочисленные мелкие смоляные ходы. Древесина плотная, темная и тяжелая.

**Сосна.** Ядровая порода. Ядро розоватого цвета. Заболонь широкая желтовато-белого цвета. Ранняя древесина имеет желтовато-белый цвет, а поздняя – светло-коричневый или красновато-бурый. Смоляные ходы крупные, многочисленные, они наблюдаются на продольных срезах в виде серых продольных штрихов.

Древесина средней плотности, высокой прочности.

**Ель.** Спелодревесная порода. Древесина белая со слабозеленоватым оттенком. Ранняя древесина желтовато-белого цвета, а поздняя – серо-пепельного. Смоляные ходы малочисленные и мелкие, заметны на продольных срезах в виде серых продольных полосок.

**Пихта.** Спелодревесная порода. Древесина белая со слабозеленоватым оттенком. Ранняя древесина имеет желтовато-белый цвет, а поздняя – серо-пепельный. Ранняя зона значительно шире поздней. Смоляных ходов нет. Древесина очень легкая, малоусыхающая, непрочная, мягкая и хрупкая.

**Дуб.** Ядровая порода. Ядро бурого цвета, а заболонь - желтовато-белого. Мелкие сосуды в поздних зонах образуют светлые треугольнички. Имеются широкие сердцевинные лучи, видимые на торцовом срезе в виде блестящих линий, идущих по радиусам. Древесина твердая, плотная, эластичная.

**Ясень.** Ядровая порода. Ядро светло-бурого цвета. Заболонь широкая, желтовато-серого цвета. Мелкие сосуды образуют в поздней зоне хаотично разбросанные белые точки. Многочисленные сердцевинные лучи узкие и практически не видны. Древесина твердая, тяжелая, упругая, умеренно высыхающая, прочная, вязкая

**Ильм.** Ядровая порода. Ядро красновато-бурого цвета. Мелкие сосуды в поздней зоне имеют вид светлых волнистых линий. Многочисленные сердцевинные лучи на радиальном срезе образуют рябоватый рисунок в виде блестящих точек, черточек. Древесина твердая, тяжелая.

**Берест.** Ядровая порода. Ядро красновато-коричневого цвета. Мелкие сосуды наблюдаются в поздней зоне в виде светлых танген-

циальных полосочек. Сердцевинные лучи образуют на продольных срезах рябоватый рисунок.

**Вяз.** Ядровая порода. Ядро светло-бурого цвета, заболонь желтовато-белого. Мелкие сосуды в поздней зоне образуют светлые волнистые линии. Сердцевинные лучи узкие, заметны на радиальном срезе.

**Береза.** Безъядровая порода. Древесина белого цвета с сероватым, желтоватым или красноватым оттенком. Годичные слои едва заметны на всех срезах. Древесина однородная, однородная, тяжелая, плотная. Иногда образуется ложное ядро розовато-коричневого цвета.

**Клен.** Безъядровая порода. Древесина желтовато-белого или красновато-белого цвета, однородного строения. Сердцевинные лучи образуют на радиальном срезе рябоватый рисунок. Часто формируется ложное ядро, отделяемое по краям тонкой каймой серого цвета с зеленоватым оттенком. Древесина твердая, плотная, гладкая и блестящая.

**Бук.** Безъядровая порода. Древесина белая с желтоватым оттенком. Сердцевинные лучи образуют на тангенциальном срезе штриховой рисунок в виде многочисленных темных продольных штрихов, а на радиальном срезе - рябоватый рисунок. Иногда формируется ложное ядро красновато-бурого цвета. Древесина твердая и тяжелая.

**Осина.** Безъядровая порода. Древесина белая с желтовато-зеленоватым оттенком. Годичные слои различаются плохо. Древесина однородная, мягкая, легкая.

**Липа.** Безъядровая порода. Древесина белая со слабозеленоватым оттенком. Годичные слои различаются нечетко. Сердцевинные лучи узкие, на радиальном срезе они наблюдаются в виде блестящих масляных пятнышек. Древесина однородная, легкая, очень мягкая.

**Ольха серая.** Безъядровая порода. Древесина розоватого цвета. Годичные слои различаются плохо. Сердцевинные лучи очень узкие, невидимые. Древесина однородная, легкая.

**Ольха черная.** Безъядровая порода. Древесина розоватого цвета, без рисунка. Сердцевинные лучи узкие, невидимые. Годичные слои различаются. Древесина мягкая, однородная, легкая

**Рябина.** Ядровая порода. Ядро красновато-коричневого цвета, заболонь - розовато-белого. Годичные слои хорошо заметны на всех срезах. Древесина твердая, тяжелая, блестящая.

**Черемуха.** Ядровая порода. Ядро рыжевато-коричневого цвета, заболонь - желтовато-белого. Годичные слои заметные, широкие. Древесина мягкая, легкая.

**Граб.** Безъядровая порода. Древесина серого цвета. Годичные слои извилистые. Сердцевинные лучи ложноширокие. Древесина твердая, тяжелая, плотная, гладкая, скользкая, мыльная на ощупь.

**Тополь.** Ядровая порода. Ядро желтовато-бурого цвета неравномерной окраски. Заболонь широкая, серовато-белого цвета. Годичные слои широкие, слабо заметные. Сердцевинные лучи очень узкие. Древесина мягкая.

**Орех.** Ядровая порода. Ядро коричневатой-серой неравномерной окраски. Заболонь широкая сероватого цвета. Сердцевинные лучи на радиальном срезе образуют полосы, направленные поперек годичных слоев.

## 2. Механические свойства древесины

### 2.1. Характеристика механических свойств

Механические свойства древесины базируются на физических законах классической механики и к ним обычно относят плотность древесины, прочность, деформативность, а также технологические и эксплуатационные свойства, например, твердость, ударная вязкость, истирание, гнутье и др.

На показатели механических свойств влияет анизотропия древесины, ориентация годичных слоев, сердцевинных лучей, направление внешних механических сил, а также влажность древесины. Прочность древесины определяют при стандартной влажности  $W=12\%$  и при полном насыщении клеточных оболочек  $W=30\%$ .

Для получения сопоставимых результатов испытаний показатели прочности приводятся к стандартной влажности по формуле:

$$\sigma_{12} = \sigma_w (1 + \alpha(W - 12)), \quad (1)$$

где  $\sigma_{12}$  – напряжение при стандартной влажности, МПа;

$\sigma_w$  – напряжение при влажности в момент испытания, МПа;

$W$  – влажность древесины в момент испытания, %;

$\alpha$  – поправочный коэффициент на влажность.

Деформативные свойства приводятся к стандартной влажности по формуле:

$$C_{12} = \frac{C_w}{(1 - \alpha(W - 12))}, \quad (2)$$



где  $C_{12}$  – показатель деформативности при стандартной влажности;  
 $C_w$  – показатель при влажности в момент испытания;  
 $W$  – влажность древесины в момент испытания, %;  
 $\alpha$  – поправочный коэффициент на влажность.

## 2.2. Плотность древесины

### 2.2.1. Понятие плотности

Плотность является одним из наиболее важных физических показателей свойств древесины как материала.

Плотностью древесины, как неоднородного материала, называется отношение массы тела к его объему [3].

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (3)$$

Плотность определяется массой (в граммах, килограммах, тоннах) одного  $\text{см}^3$  или  $\text{м}^3$  древесины. Плотность имеет размерность  $\text{г/см}^3$  или  $\text{кг/м}^3$ , или  $\text{т/м}^3$ . Плотность – есть масса 1  $\text{см}^3$  или 1  $\text{м}^3$  древесины.

В зависимости от влажности древесины различают следующие способы выражения плотности: стандартная (нормализованная), или табличная,  $\rho_{12}$  (при стандартной влажности 12%); во влажном состоянии  $\rho_w$ ; в абсолютно сухом состоянии  $\rho_o$ ; условная  $\rho_{\text{усл.}}$  (отношение массы абсолютно сухой древесины к объему максимально разбухшей при  $W = 30\%$ ) (табл. 1) [1].

Таблица 1

Плотность пород древесины

Порода	Плотность, $\text{кг/м}^3$			Порода	Плотность, $\text{кг/м}^3$		
	$\rho_{12}$	$\rho_o$	$\rho_{\text{усл.}}$		$\rho_{12}$	$\rho_o$	$\rho_{\text{усл.}}$
Лиственница	660	630	520	Дуб	690	650	550
Сосна	500	470	400	Береза	630	600	500
Ель	445	420	360	Бук	670	640	530
Кедровая сосна	435	410	350	Осина	495	470	400
Пихта	375	350	300	Ольха	520	490	420

Значение плотности зависит от строения древесины и содержания в ней экстрактивных веществ (смол). Значения плотности изменяются в пределах древесной породы, внутри одного ствола дерева.

### 2.2.2. Распределение плотности в стволе дерева

Плотность древесины зависит от ее влажности и положения образца в стволе дерева.

**Плотность древесинного вещества** в абсолютно сухом состоянии представляет собой отношение массы вещества, образующего клеточные стенки древесины к ее объему. Древесинное вещество представляет собой материал клеточных стенок древесины. Его плотность не зависит от породы древесины и равна  $1530 \text{ кг/м}^3$ . Плотность древесины из-за наличия в ней пустот, заполненных воздухом, колеблется в пределах от  $100 \text{ кг/м}^3$  до  $1300 \text{ кг/м}^3$ .

Распределение плотности древесины по стволу дерева в свежесрубленном и абсолютно сухом состоянии приведено на рис. 7, 8 [4].

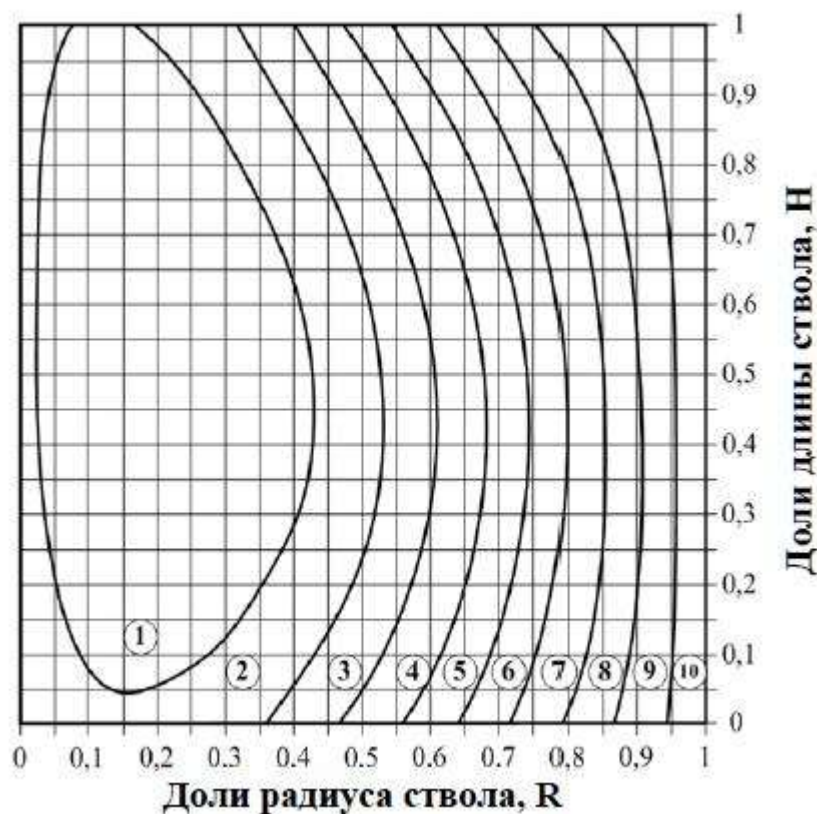


Рис. 7. Распределение плотности по стволу сосны в свежесрубленном состоянии,  $\text{кг/м}^3$ :

1 – 450-500; 2 – 500-550; 3 – 550-600; 4 – 600-650; 5 – 650-700; 6 – 700-750;  
7 – 750- 800; 8 – 800-850; 9 – 850-900; 10 – 900-950

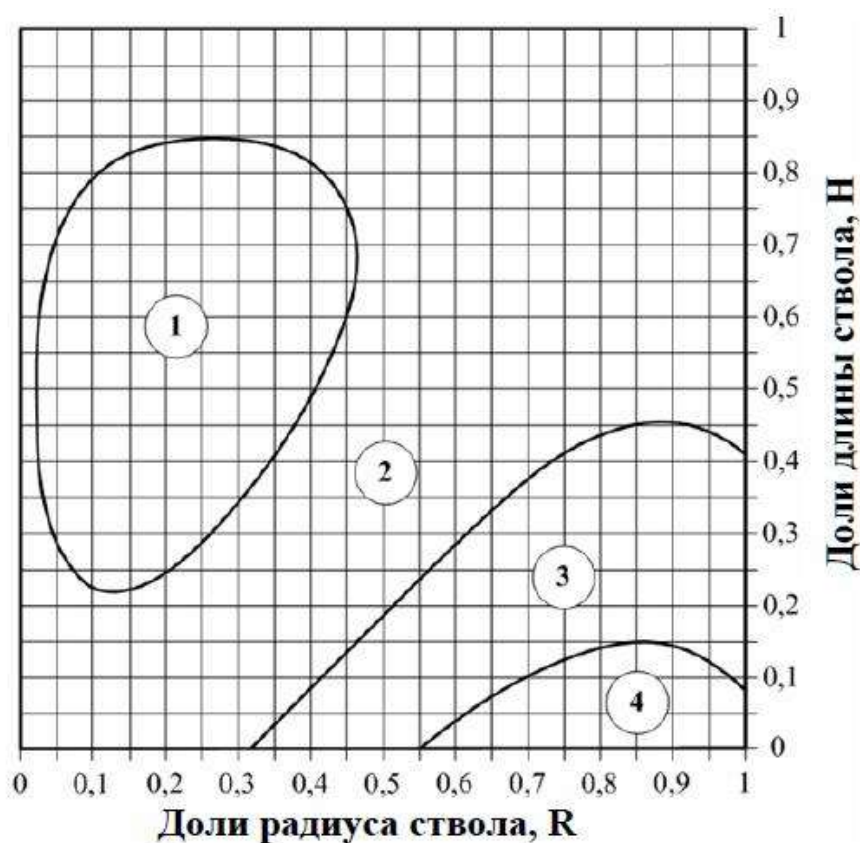


Рис. 8. Распределение плотности по стволу сосны в абсолютно сухом состоянии, кг/м<sup>3</sup>:  
1 – 350-400; 2 – 400-450; 3 – 450-500; 4 – 500-550.

### 2.2.3. Определение плотности

Плотность образца при влажности  $W$  в момент испытания вычисляют по формуле (ГОСТ 16483.1-84)

$$\rho_w = \frac{m_w}{a_w b_w l_w} = \frac{m_w}{V_w}, \quad (4)$$

где  $m_w$  - масса образца при влажности  $W$ , кг (г);

$a_w, b_w, l_w$  - размеры образца при влажности  $W$ , м (см);

$V_w$  - объем образца при влажности  $W$ , м<sup>3</sup> (см<sup>3</sup>).

Плотность образца с нормализованной влажностью при необходимости пересчитывают на влажность 12 % по формуле

$$\rho_{12} = \left(1 - \frac{(1 - K)(W - 12)}{100}\right) \rho_w, \quad (5)$$

где  $K$  – коэффициент объемного разбухания.

Для ориентировочных расчетов коэффициент  $K$  может быть принят равным  $0,85 \cdot 10^{-3} \rho_w$  при измерении плотности в килограммах на кубический метр и  $0,85 \rho_w$  при измерении в граммах на кубический сантиметр.

### 2.3. Прочность и деформативность древесины

Древесина способна под действием внешних сил деформироваться, изменять свои размеры и форму. В деформированном теле возникают внутренние упругие силы, которые уравнивают внешние силы.

Деформации могут быть упругими, которые исчезают после снятия внешней силы. Ранее смещенные частицы тела возвращаются в исходное положение. Деформации могут быть пластическими, если смещенные частицы тела из-за перестройки внутренней структуры не могут вернуться в исходное положение.

В древесине возникают напряжения. Напряжение – физическая величина, численно равная упругой силе, приходящейся на единицу площади поперечного сечения тела, МПа:

$$\sigma = \frac{F_y}{S}. \quad (6)$$

Напряжение называется нормальным, если внешняя сила перпендикулярна к поверхности  $S$ , и касательным, если сила касательна к этой поверхности.

Мерой деформации является относительная деформация  $\frac{\Delta x}{x}$ , равная отношению абсолютной деформации  $\Delta x$  к первоначальному значению величины  $x$ , характеризующей размер тела [3].

При кратковременных воздействиях относительно небольших нагрузок древесина ведет себя как упругий материал и подчиняется закону Гука. Напряжение  $\sigma$  при упругой деформации тела пропорционально относительной деформации:

$$\sigma = K \frac{\Delta x}{x}, \quad (7)$$

где  $K$  – **модуль упругости**, численно равный напряжению, которое возникает при относительной деформации, равной единице.

При одностороннем растяжении (сжатии) тела под действием силы происходит удлинение (укорочение) длины. Упругое растяжение (сжатие) прекращается при условии  $F_y = F$ . Мерой удлинения является относительное удлинение (сжатие)  $\frac{\Delta l}{l}$ . В этом случае  $K = E$

, где  $E$  называется модулем **Юнга**. По закону Гука

$$\Delta l = \frac{Fl}{ES}, \quad (8)$$

где  $l$  – первоначальная длина тела;

$\Delta l$  – изменение длины тела при нагрузке  $F$ .

При условии  $\Delta l = l$  получим

$$E = \frac{F}{S} = \sigma. \quad (9)$$

Получается, что модуль **Юнга** численно равен напряжению, возникающему в образце при увеличении (укорочению) его длины в два раза при прочих равных условиях.

При относительном продольном растяжении (сжатии) происходит относительное поперечное сужение (утолщение) образца  $\frac{\Delta d}{d}$ , где  $d$  – поперечный размер образца. Величину  $\mu$ , равную

$$\mu = \frac{\Delta d}{d} = \frac{\Delta l}{l}, \quad (10)$$

называют коэффициентом **Пуассона**.

Закон Гука действует в узких пределах. Напряжение, при котором нарушается пропорциональность между напряжением и деформацией, называется пределом пропорциональности.

При сжатии деревянного образца вдоль волокон на участке  $OA$  древесина работает почти упруго, и рост напряжений происходит пропорционально увеличению деформаций. Точка  $A$  – предел пропорциональности. При дальнейшем увеличении нагрузки деформации начинают расти быстрее, чем напряжения. Точка  $B$  – предел упругости. Точка  $C$  – предел прочности. Диаграмма указывает на упругопластическую область работы материала.

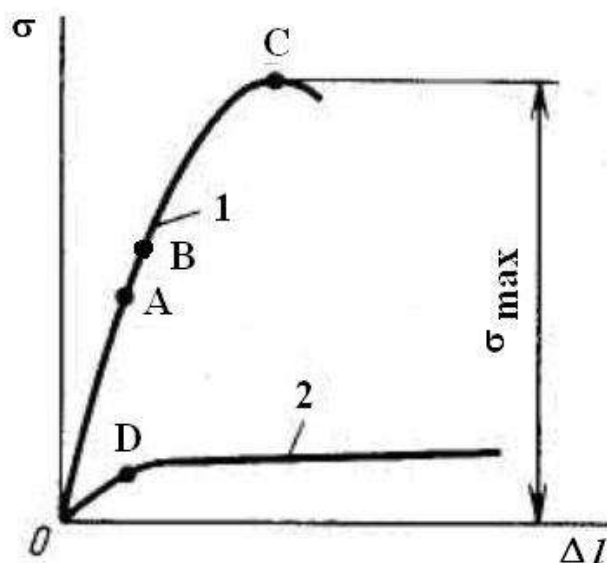


Рис. 9. Зависимость напряжений от относительной деформации при:  
1 – растяжении древесины вдоль волокон;  
2 – при сжатии поперек волокон

При сжатии образца поперек волокон до небольшой нагрузки (точка *D*), соответствующей пределу пропорциональности, между нагрузкой и деформацией существует линейная зависимость. Затем деформации быстро увеличиваются, а нагрузка растет незначительно. В результате образец спрессовывается – уплотняется. При наличии в нем пороков (сучки, трещины и др.) он может разрушиться. Разрушающая нагрузка определяется условно. Она соответствует деформации сжатия образца на  $\frac{1}{3}$  своей первоначальной высоты.

Как видно из диаграмм, сопротивление древесины сжатию вдоль волокон значительно больше сопротивления поперек волокон (в 8... 10 раз).

## 2.4. Прочность древесины при растяжении

*Прочность* древесины характеризует ее способность сопротивляться разрушению под действием механических нагрузок.

Различают прочность древесины при растяжении вдоль волокон, растяжении поперек волокон в радиальном и тангенциальном направлениях. Испытания на прочность проводят стандартными методами на чистых без пороков малых (базисное сечение  $20 \times 20$  мм)

образцах при статических нагрузках. Показатели прочности приводят к единой влажности 12%.

При испытаниях определяют (ГОСТ 16483.23-73) предел прочности образца с влажностью  $W$  в момент испытания с точностью до 1 МПа по формуле

$$\sigma_w = \frac{F_{\max}}{ab},$$

где  $F_{\max}$  – максимальная нагрузка, Н;

$a, b$  – размеры поперечного сечения рабочей части образца, мм. Показатели пределов прочности приведены в табл. 2 [1].

Таблица 2

Пределы прочности древесины некоторых пород  
при растяжении вдоль волокон

Порода древесины	Предел прочности, МПа		Порода древесины	Предел прочности, МПа	
	$W = 12\%$	$W = 30\%$ и более		$W = 12\%$	$W = 30\%$ и более
Лиственница	124	94,5	Береза	136,5	102
Сосна	102	77,6	Осина	121	92,7
Ель	101	77,2	Тополь	87,8	67
Кедр	89,2	68	Липа	117	89,4
Пихта	66,3	50,5	Ольха	97,3	74,3
сибирская					
Дуб	105	-	Ива	99,1	75,8
черешчатый					
Вяз	84,5	-	Рябина	131	-
Ясень обыкновенный	140	107	Бук	124	92,6
Акация					
белая	171	107	Граб	128,5	96,3

Как следует из таблицы, древесные породы обладают высокой прочностью на растяжение вдоль волокон, изменяясь от 65 до 170 МПа. Это только в 2 раза меньше, чем для образцов, выполненных из стали марки 10. При этом деревянные детали в конструкциях на растяжение не работают из-за разрушения их в местах защемления.

При растяжении поперек волокон прочность древесины заметно ниже, и составляет примерно 1/20 часть предела прочности вдоль волокон.

## 2.5. Прочность древесины при сжатии

Древесина адаптирована к сжатию вдоль волокон уже в процессе роста дерева.

Испытания на прочность проводят на стандартных образцах сечением  $20 \times 20$  мм и высотой вдоль волокон 30 мм. Нагрузка на образец передается со скоростью, обеспечивающей разрушение образца в течение  $1,0 \pm 0,5$  мин после начала нагружения (ГОСТ 16483.10-73). Показатели прочности приводят к единой влажности 12%.

Предел прочности древесины вычисляют по формуле, МПа:

$$\sigma_w = \frac{F_{\max}}{ab},$$

где  $F_{\max}$  – максимальная нагрузка, Н;

$a, b$  – размеры поперечного сечения рабочей части образца, мм.

Разрушение образца показано на рис. 10.

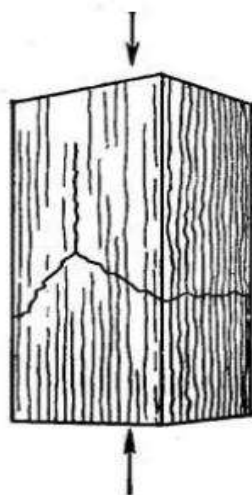


Рис. 10. Схема разрушения образца при сжатии вдоль волокон

Предел прочности в МПа пересчитывают на влажность 12 % по формулам:

для образцов с влажностью меньше предела гигроскопичности

$$\sigma_{12} = \sigma_w (1 + \alpha(W - 12)),$$



где  $\sigma_{12}$  – напряжение при стандартной влажности, МПа;

$\sigma_w$  – напряжение при влажности в момент испытания, МПа;

$W$  – влажность древесины в момент испытания, %;

$\alpha$  – поправочный коэффициент на влажность.

Для образцов с влажностью, равной или больше предела гигроскопичности

$$\sigma_{12} = \frac{\sigma_w}{K_{12}^{30}},$$

где  $\sigma_w$  – предел прочности образца с влажностью  $W$  в момент испытания, МПа;  $K_{12}^{30}$  – коэффициент пересчета при влажности 30 %, равный, 0,475 - для клена; 0,535 - для вяза шершавого эллиптического и ясеня; 0,550 - для акации, вяза гладкого, листоватого и среднего, дуба, липы и ольхи; 0,450 - для бука, сосны кедровой и обыкновенной; 0,445 - для граба, груши, ели, ивы, ореха, осины, пихты и тополя; 0,400 - для березы и лиственницы.

Показатели пределов прочности приведены в табл. 3 [1].

Таблица 3

Пределы прочности древесины некоторых пород  
при сжатии вдоль волокон

Порода древесины	Предел прочности, МПа		Порода древесины	Предел прочности, МПа	
	$W = 12\%$	$W = 30\%$ и более		$W = 12\%$	$W = 30\%$ и более
Лиственница	61,5	24,8	Береза	54,0	26,3
Сосна	46,3	20,8	Осина	43,1	18,8
Ель	45,0	19,2	Тополь	40,0	17,4
Кедр	40,0	16,4	Липа	45,8	23,7
Пихта	40,0	17,2	Ольха	44,5	23,1
сибирская					
Дуб	57,1	30,5	Ива	38,2	16,5
черешчатый					
Вяз	45,6	24,7	Рябина	56,5	-
Ясень обыкновенный	56,2	31,8	Бук	52,9	26,8
Акация	73,1	40,8	Граб	60,9	36,4
белая					

Показатели прочности считаются высокими, что позволяет широко использовать древесину в конструкциях, несущих нагрузки продольного сжатия.

Сжатие древесины в поперечном направлении в естественных условиях растущего дерева не возникает. Предел прочности на сжатие поперек волокон в 10 раз меньше предела прочности вдоль волокон.

## 2.6. Прочность древесины при изгибе

Испытания прочности древесины на изгиб производят на образцах сечением  $20 \times 20$  мм и длиной вдоль волокон 300 мм. Нагрузка прикладывается в середине длины образца в поперечном направлении (ГОСТ 16483.3-84). Образец помещают в машину так, чтобы изгибающее усилие было направлено по касательной к годичным слоям (изгиб тангентальный) и нагружают по схеме, показанной на рис. 11.

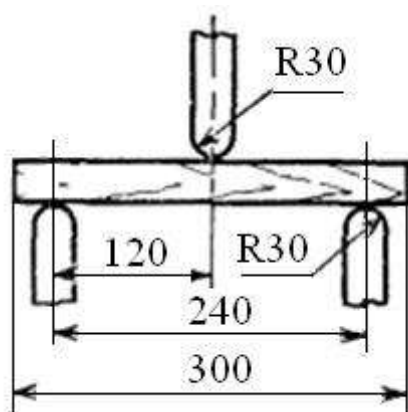


Рис. 11. Схема испытаний на изгиб

При этом при статическом изгибе в нижней части образца возникают растягивающие напряжения, а в верхней – сжимающие.

Образец нагружают равномерно с постоянной скоростью нагружения. Скорость должна быть такой, чтобы образец разрушился через  $1,5 \pm 0,5$  мин после начала нагружения.

Предел прочности образца с влажностью в момент испытания вычисляют по формуле, МПа:

$$\sigma_w = \frac{3F_{\max} l}{2bh^2}, \quad (11)$$

где  $F_{\max}$  – максимальная нагрузка, Н;

$l$  - расстояние между центрами опор, мм;

$h$  - высота образца, мм;

$b$  - ширина образца, мм.

В растущем дереве изгибающие нагрузки возникают постоянно, поэтому древесина приспособлена их воспринимать. Предел прочности древесины имеет высокие значения, в среднем около 100 МПа (табл. 4)

Таблица 4

Пределы прочности древесины некоторых пород  
при статическом изгибе

Порода древесины	Предел прочности, МПа		Порода древесины	Предел прочности, МПа	
	$W = 12\%$	$W = 30\%$ и более		$W = 12\%$	$W = 30\%$ и более
Лиственница	108,8	60,5	Береза	109,5	64,5
Сосна	84,5	48,5	Осина	76,5	44,5
Ель	78,6	43	Тополь	68	39,5
Кедр	69,2	36,3	Липа	86,4	53,1
Пихта	67,9	39,6	Ольха	78,9	48,4
сибирская					
Дуб	103	66,4	Ива	70,7	40,8
черешчатый					
Вяз	92,4	57,9	Рябина	97,9	-
Ясень обыкновенный	118	72,8	Бук	104	62,9
Акация					
белая	148	95,6	Граб	127,7	93,8

Предел прочности образца с влажностью меньше предела гигроскопичности при необходимости пересчитывают на влажность 12 % по формуле

$$\sigma_{12} = \sigma_w (1 + \alpha(W - 12))$$

где  $\alpha$  – поправочный коэффициент на влажность, равный 0,04 для всех пород;

$W$  - влажность образца в момент испытания, %.

Предел прочности образца с влажностью больше предела гигроскопичности пересчитывают на влажность 12 % по формуле

$$\sigma_{12} = \frac{\sigma_w}{K_{12}^{30}},$$

где  $\sigma_w$  – предел прочности образца с влажностью  $W$  в момент испытания, МПа;

$K_{12}^{30}$  – коэффициент пересчета, определяемый по таблице ГОСТа при известной плотности древесины.

Повышение влажности заметно понижает сопротивление древесины изгибу.

## 2.7. Прочность древесины при скалывании

Испытание на скалывание проводят по тангентальной и радиальной плоскостям. Форма и размеры образцов должны соответствовать рис. 12 (ГОСТ 16483.5-73).

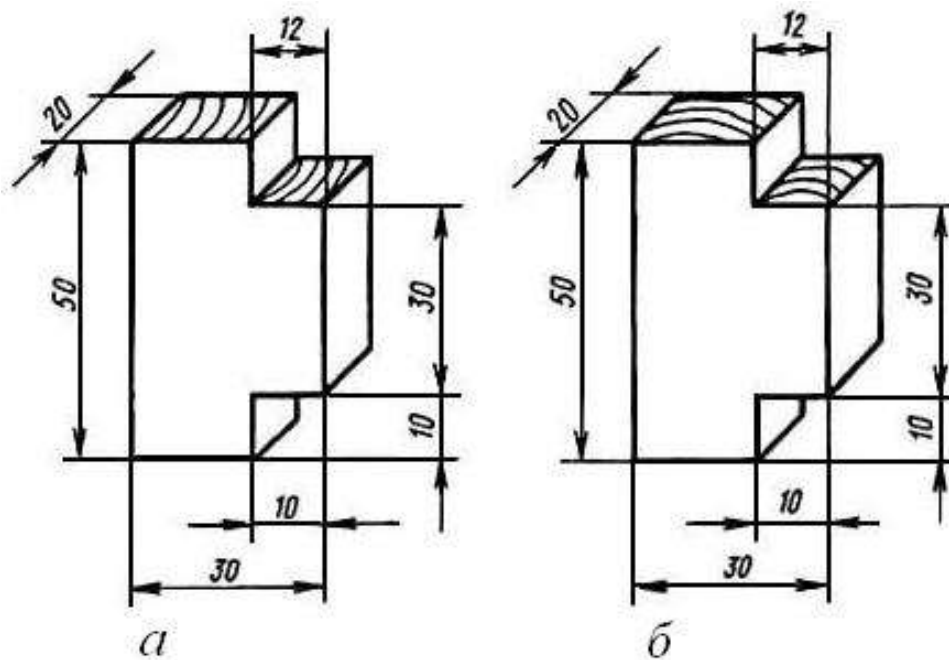


Рис. 12. Образцы для испытания на скалывание древесины в плоскостях:

$a$  – тангентальной;  $b$  – радиальной

Образец помещают в приспособление для испытания на скалывание (рис. 13). Подвижную опору подводят до соприкосновения с образцом. Нагрузку на образец передают через нажимную призму с шаровой опорой. Образец нагружают равномерно с постоянной скоростью нагружения или постоянной скоростью перемещения нагружающей головки машины. Скорость должна быть такой, чтобы образец разрушился через  $1,0 \pm 0,5$  мин с момента нагружения. При использовании машины с электромеханическим приводом допускается проводить нагружение образца равномерно со скоростью  $4000 \pm 1000$  Н/мин или проводить испытания при скорости перемещения нагружающей головки испытательной машины 4 мм/мин, при условии достижения предела прочности при скалывании вдоль волокон в указанный интервал времени.

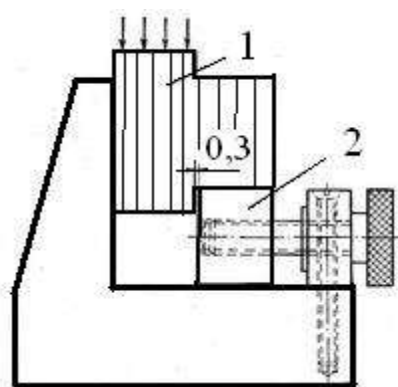


Рис. 13. Схема испытания образцов древесины на скалывание вдоль волокон:

1 – образец для испытаний; 2 – опора подвижная

Предел прочности древесины вычисляют по формуле, МПа:

$$\tau_w = \frac{F_{\max}}{bl}, \quad (12)$$

где  $F_{\max}$  – максимальная нагрузка, Н;

$b$  – толщина образца, мм;

$l$  – длина скалывания, мм.

Вычисление производят с округлением до 0,1 МПа.

Предел прочности пересчитывают на влажность 12 % по формулам, МПа:

– для образцов с влажностью меньше предела гигроскопичности

$$\tau_{12} = \tau_w(1 + \alpha(W - 12))$$

где  $\alpha$  – поправочный коэффициент на влажность, равный 0,03 для всех пород;

$W$  - влажность образца в момент испытания, %;

– для образцов с влажностью, равной или больше предела гигроскопичности

$$\tau_{12} = \frac{\tau_w}{K_{12}^{30}}$$

где  $K_{12}^{30}$  – коэффициент пересчета при влажности 30 %, равный 0,730 - для акации, вяза и дуба; 0,535 - для березы и ореха; 0,610 - для бука и груши, сосны кедровой и обыкновенной, ели и лиственницы; 0,570 - для граба, ивы, осины и тополя; 0,650 - для клена, липы, ольхи, пихты и ясеня.

Предел прочности древесины имеет высокие значения, в среднем около 9 МПа (табл. 5)

Таблица 5

Пределы прочности древесины некоторых пород  
при статическом изгибе [1]

Порода древесины	Предел прочности, МПа		Порода древесины	Предел прочности, МПа	
	$W = 12\%$	$W = 30\%$ и более		$W = 12\%$	$W = 30\%$ и более
Лиственница	9,78	6,2	Береза	9,0	5,8
Сосна	7,44	4,2	Осина	6,15	3,5
Ель	6,88	4,0	Тополь	5,96	3,3
Кедр	6,36	3,8	Липа	8,42	5,5
Пихта	5,87	3,7	Ольха	7,97	5,1
сибирская					
Дуб	9,87	7,4	Ива	7,26	4,0
черешчатый					
Вяз	8,85	6,4	Рябина	11,2	-
Ясень обыкновенный	13,4	9,2	Бук	12,1	7,2
Акация					
белая	13,2	9,7	Граб	14,7	8,5

Прочность на скалывание у лиственных пород древесины примерно в 1,6 раза выше, чем у хвойных.

## 2.8. Прочность древесины при длительных нагрузках

При нагрузке, действующей, например, в строительных деталях в течение нескольких лет их эксплуатации, разрушение деталей происходит при напряжениях, меньших по величине предела прочности при статических испытаниях. Предел прочности при долговременном сопротивлении  $\sigma_{\partial}$  обычно находят по следующей формуле [1]:

$$\sigma_{\partial} = \sigma_{cm} + \alpha(\lg \tau_{cm} - \lg \tau), \quad (13)$$

где  $\sigma_{cm}$  – Предел прочности при статических испытаниях, МПа;

$\alpha$  – поправочный коэффициент;

$\tau_{cm}$  – длительность статических испытаний;  $\tau_{cm} = 1 \dots 2$  мин;

$\tau$  – длительность работы конструкции, мин.

Обычно  $\sigma_{\partial} = (0,5 \dots 0,6) \sigma_{cm}$ .

## 2.9. Твердость древесины

Твердостью называется способность твердого тела сопротивляться внедрению в него более твердых тел. Существуют различные методы определения твердости: статические, динамические (ударные) и ультразвуковые. Статические методы: по Бринеллю (рис. 14), Виккерсу по Роквеллу и др.

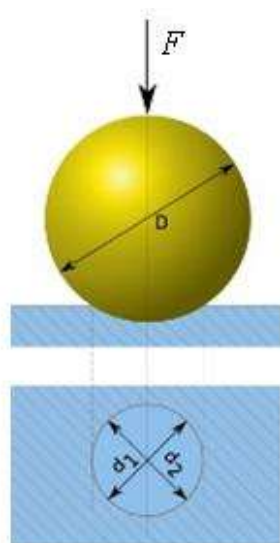


Рис. 14. Измерение твердости по Бринеллю

Измерение твердости по Бринеллю происходит путем внедрения с заданной нагрузкой закаленного стального шарика (диаметром 2,5 мм; 5 мм или 10 мм) в поверхность испытуемого образца. В результате на поверхности образца получается отпечаток. С помощью лупы измеряют диаметр отпечатка.

Для определения статической твердости древесины по ГОСТ 16483.17-81 используют пуансона с наконечником в виде полусферы радиусом  $(5,64 \pm 0,01)$  мм.

При испытании образец помещают в приспособление, как показано на рис. 15. В верхнюю грань образца вдавливают пуансон на глубину 5,64 мм, а в случае раскалывания образца – на глубину 2,82 мм. Постоянная скорость нагружения или перемещения нагружающей головки машины должна быть такой, чтобы необходимая глубина вдавливания пуансона в образец была достигнута не менее чем через 1 мин и не более чем через 2 мин после начала нагружения.

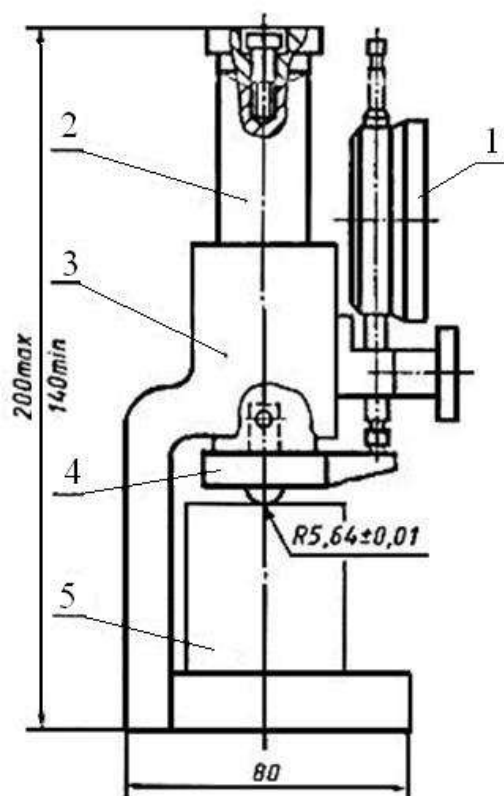


Рис. 15. Устройство для измерения твердости древесины:  
1 – индикатор; 2 – шток; 3 – корпус устройства;  
4 – пуансон съемный; 5 – образец испытуемый



При использовании подачи с электромеханическим приводом допускается вдавливать пуансон с постоянной скоростью от 3 до 6 мм/мин. При достижении указанной глубины вдавливания пуансона в образец определяют нагрузку с погрешностью не более 1%.

Статическую твердость образца при влажности в момент испытания при заглублении 5,64 мм вычисляют в Н/мм по формуле

$$H_{w'} = \frac{F}{\pi r^2}, \quad (14)$$

где  $F$  – нагрузка при вдавливании пуансона в образец, Н;  
 $r$  – радиус полусферы пуансона, мм.

При радиусе полусферы 5,64 мм выражение  $\pi r^2$  равно 100 мм<sup>2</sup>.

Статическую твердость образца при влажности в момент испытания при заглублении 2,82 мм вычисляют в Н/мм<sup>2</sup> по формуле

$$H_{w'} = \frac{4F}{3\pi r^2}. \quad (15)$$

На степень твердости оказывает влияние влажность древесины.

По этому параметру все древесные породы при 12 %-ной влажности можно разделить на три группы:

- мягкие – торцовая твердость 40 МПа и менее (сосна, ель, кедр, пихта, можжевельник, тополь, липа, осина, ольха, каштан);
- твердые – торцовая твердость 40,1–80 МПа (лиственница, береза сибирская, бук, дуб, вяз, платан, рябина, клен, лещина, орех грецкий, хурма, яблоня, ясень);
- очень твердые – торцовая твердость более 80 МПа (акация белая, граб, кизил, самшит, фисташка, тисс).

Твердые породы древесины более износостойки по сравнению с мягкими породами. Твердость имеет существенное значение при обработке древесины резанием на станках: при фрезеровании, пилении, строгании, лущении, сверлении и др. Твердость необходима при изготовлении деталей, работающих на истирание, например, деталей полов, лестниц, перил. В производстве паркета и паркетной доски из массива применяют породы с твердостью не ниже средней.

Твердость тангенциальной и радиальной поверхностей различных пород практически одинакова (у дуба, бука и ильма радиальная поверхность тверже тангенциальной на 5-10%) и меньше твердости

торцевой поверхности в среднем на 30% у лиственных пород и на 40% у хвойных.

При повышении влажности ее твердость понижается.

Ударную твердость древесины определяют по площади проекции отпечатка от удара стальным шариком диаметром 25 мм при свободном падении его с высоты 500 мм. Значение ударной твердости равно отношению потенциальной энергии шарика к площади проекции отпечатка. Единица измерения ударной твердости – кДж/см<sup>2</sup>.

## 2.10. Сила внешнего трения

### 2.10.1. Сила трения скольжения

При взаимодействии деревянных тел с другими телами возникают силы внешнего трения. Они представляют собой соприкосновение взаимодействия между телами, возникающее в месте их контакта и препятствующее их относительному перемещению [3].

Различают трение скольжения и трение качения. При трении скольжения контактирующие тела при относительном перемещении цепляются микронеровностями поверхностей друг за друга, которые упруго и пластически деформируются и срезаются. Преодолеваемое сцепление однородных молекул называется **когезией**. Кроме того, под действием сил молекулярного притяжения на срезанных поверхностях возникает прилипание тел, называемое **адгезией**.

Итак, трение скольжение является результатом действия сил адгезии и когезии.

Пусть на наклонной плоскости лежит деревянный брусок массой  $m$  (рис. 16). Под действием силы тяжести на него действует сила тяги

$$F = mg \sin \alpha$$

и сила трения, равная по закону Амонтона

$$F_{\text{т}} = fN,$$

где  $f$  – коэффициент трения скольжения;

$N$  – сила нормального давления бруска на плоскость.

$$F_{\text{т}} = mgf \cos \alpha.$$

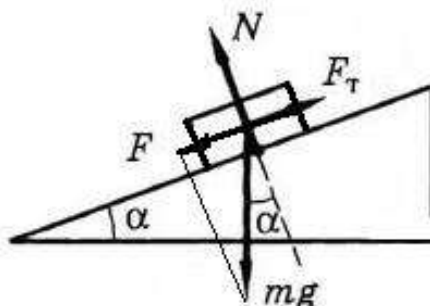


Рис. 16. Схема движения бруска по наклонной плоскости

С увеличением угла наклона  $\alpha$  сила  $F$  увеличивается, и при некотором значении  $\alpha$  силы  $F$  и  $F_T$  уравниваются. Наступит начало движения бруска по плоскости вниз. Из равенства  $F$  и  $F_T$  получим, коэффициент трения (табл. 6)

$$f = \operatorname{tg} \alpha. \quad (16)$$

Таблица 6

Значения коэффициента трения

Взаимодействующие тела	Коэффициент трения	
	покоя	скольжения
Дерево по дереву	0,4...0,7	0,2...0,5
Дерево по металлу	0,4...0,6	0,3...0,5
Дуб вдоль волокон по дубу вдоль волокон	-0,62	
Дуб поперек волокон по дубу поперек волокон	-	0,54

### 2.10.2. Сила трения качения

При качении цилиндрических или другой формы тел по плоской поверхности, возникают упругие и пластические деформации. В связи с этим линия действия реакции  $R$  плоскости не совпадает с линией действия нормальной силы  $N$ . Горизонтальная составляющая  $F$  является силой трения качения. По закону Кулона можно считать, что

$$F = k \frac{N}{R}, \quad (17)$$

где  $R$  – радиус тела качения, мм;

$k$  – коэффициент трения качения, мм.

Пусть ролик катится по поверхности деревянной заготовки и под действием силы нормального давления  $N$  деформирует ее (рис. 15). Силу реакции в точке  $A$  заготовки разложим на силу трения  $F_T$  и силу нормальную. Естественно допустить, что нормальная составляющая реакции равна  $N$ .

Кроме того в результате трения скольжения цапфы в подшипниковой опоре возникает сила трения скольжения  $F_{тс}$ .

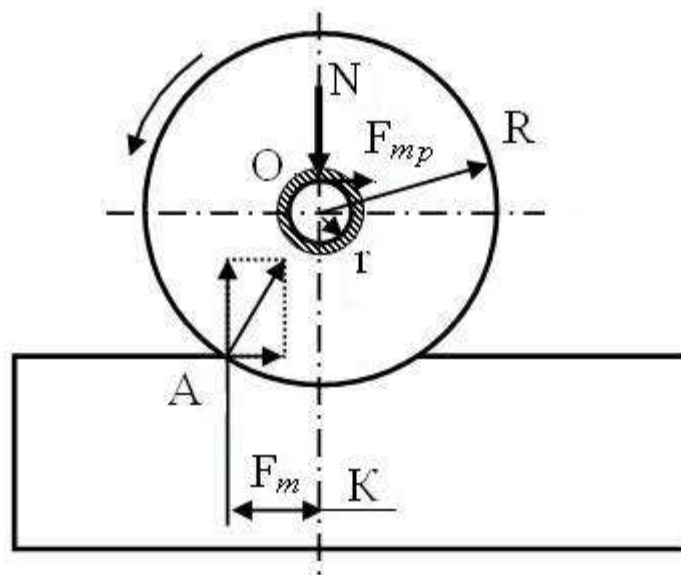


Рис. 17. Схема к расчету сил трения

Найдем сумму моментов сил относительно оси вращения  $O$ :

$$\sum M_O = 0; \quad F_T R - NK - F_{тс} r = 0, \quad F_T R - NK - Nfr = 0,$$

откуда приведенная сила трения

$$F_T = N \frac{2K + fd}{D}, \quad (18)$$

а приведенный коэффициент трения

$$f_{np} = \frac{2K + fd}{D}, \quad (19)$$

где  $K$  – коэффициент трения качения, имеющий размерность длины, мм (табл. 7);

$f$  – коэффициент трения скольжения цапфы в подшипнике;  $f=0,15 \dots 0,20$  в подшипниках скольжения; для подшипников качения принимают  $f = 0,05$ ;

$d$  – диаметр цапфы, мм;

$D$  – диаметр ролика, мм.

Таблица 7

Значения коэффициентов трения качения гладких роликов  
по древесине  $K$ , мм

Порода древесины	Влажность, %	
	12	65
Сосна	$K = 0,36 + 0,00165D$	$K = 0,45 + 0,0022D$
Береза	$K = 0,5 + 0,00135D$	$K = 0,54 + 0,0018D$
Дуб	$K = 0,168 + 0,00096D$	$K = 0,25 + 0,0014D$
Примечание: Для рифленых вальцов $K_{риф} = 1,15K$ ; для обрешиненных – $K_p = 1,3K$ .		

а приведенный коэффициент трения

$$f_{np} = \frac{2K + fd}{D}, \quad (20)$$

где  $K$  – коэффициент трения качения, имеющий размерность длины, мм (табл. 7);

$f$  – коэффициент трения скольжения цапфы в подшипнике;  $f=0,15 \dots 0,20$  в подшипниках скольжения; для подшипников качения принимается  $f = 0,05$ ;

$d$  – диаметр цапфы, мм;

$D$  – диаметр ролика, мм.

## 2.11. Модуль упругости древесины

Древесина способна изменять свои размеры и форму под действием внешних сил. При кратковременных нагрузках древесина ведет себя как упругий материал и подчиняется закону Гука [3, 14]:

$$F = -kX,$$

где  $F$  – сила упругости, Н;

$k$  – коэффициент упругости, Н/м;

$X$  – линейная деформация, м.

В пересчете на напряжения закон Гука трансформируется в формулу:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon},$$

где  $E$  – модуль упругости, Па или Н/м<sup>2</sup>;

$\sigma$  – напряжение, Па;

$\varepsilon$  – относительная деформация растяжения или сжатия.

Модуль упругости характеризует жесткость древесины (табл. 8).

Для касательных напряжений и деформаций находят модуль сдвига.

**Модуль сдвига древесины**  $G$  – это отношение между касательными напряжениями и относительным сдвигом.

Таблица 8

Модуль упругости древесины основных пород  
в продольном, радиальном и тангентальном направлениях

Порода древесины	Модуль упругости древесины на растя- жение, МПа			Модуль упругости древесины на сжатие, МПа			Модуль упру- гости на из- гиб (статиче- ский), МПа
	$E_a$	$E_t$	$E_r$	$E_a$	$E_t$	$E_r$	
Береза	18 300	490	670	16 100	520	670	15 400
Ель	14 600	490	690	14 500	430	660	11 000
Сосна	12 100	500	580	12 100	570	690	12 600
Дуб	14 300	890	1 160	14 300	970	1 340	15 400

### 3. Влажность древесины

#### 3.1. Понятие влажности

Различают абсолютную и относительную влажность древесины.

**Абсолютная влажность** древесины есть отношение массы содержащейся в древесине влаги к массе абсолютно сухой древесины, выраженная в процентах (табл. 8).

Таблица 8

Средние значения абсолютной влажности свежесрубленной древесины

Порода	Абсолютная влажность, %		
	спелой древесины или ядра	заболони	средняя
Сосна, ель	30...40	100...120	60...100
Кедр	35...65	140...200	80...110
Лиственница	40...50	100...120	50...70
Береза	—	70...90	70...90
Осина	—	80...100	80...100
Ясень	35...40	35...40	35...40
Дуб	50...80	70...80	60...80

*Пример.* Образец сырой древесины имеет массу 300 г. После сушки масса образца стала 200 г.

Абсолютная влажность древесины

$$W = \frac{M_w - M_c}{M_c} = \frac{300 - 200}{200} 100 = 50 \%. \quad (21)$$

**Относительная влажность** древесины есть отношение массы содержащейся в древесине влаги к массе сырой древесины, выраженное в процентах.

Для предыдущего примера

$$W = \frac{M_w - M_c}{M_w} = \frac{300 - 200}{300} 100 = 33 \%.$$

На практике чаще всего пользуются параметром относительной влажности древесины.

Вода в древесине может быть свободной и связанной. Свободная вода находится в полостях клеток и удерживается в них механически.

Связанная или гигроскопическая вода находится в стенках клеток, в капиллярах, радиус которых меньше  $10^{-5}$  см.. В связи с этим принято называть древесину *влажной*, если она содержит только связанную воду, и *сырой*, если она содержит связанную и свободную воду.

Предел насыщения клеточных стенок влагой (предел гигроскопичности) принято считать  $W_{н.н.} = 30\%$ .

Максимальное абсолютное содержание свободной воды зависит от размеров полостей клеток и изменяется  $60...70 \leq W_a \leq 200...250\%$ .

В растущем и свежесрубленном дереве древесина всегда сырая. Влажность ее изменяется в широком диапазоне.

### 3.2. Гигроскопичность

Древесинное вещество, образующее стенки клеток, гигроскопично. Оно способно поглощать, сорбировать влагу из воздуха. Гигроскопическая влага удерживается в стенках клеток физико-химическими связями и не может быть выдавлена. Максимальное количество связанной воды в древесине равно 30% от массы сухого древесинного вещества.

В полостях клеток может находиться свободная влага. Зимой свободная влага может замерзнуть, и лед, образующийся в полостях клеток, влияет на прочность древесины.

Удаление из древесины свободной влаги не изменяет механических свойств древесинного вещества. Удаление гигроскопической (связанной) влаги повышает плотность клеточных стенок. Так, плотность древесинного вещества при влажности  $W=30\%$  равна  $1,2 \text{ г/см}^3$ , а для абсолютно сухого древесинного вещества всех пород равна  $1,53 \text{ г/см}^3$ .



Таким образом, *гигроскопичность* – это способность древесины изменять количество связанной влаги в зависимости от изменения температурно-влажностного состояния окружающего воздуха. Предел насыщения клеточных стенок  $W_{п.н.}$  в среднем равен 30% при 20°C от массы сухого древесного вещества. С увеличением в древесине количества связанной влаги происходит разбухание древесины, то есть увеличение размеров и объема древесины. Среднее разбухание древесины при повышении содержания связанной влаги на 1% влажности называют коэффициентом разбухания.

Уменьшение содержания связанной влаги вызывает *усушку древесины*, то есть уменьшение линейных размеров. Среднюю усушку древесины при снижении содержания связанной влаги на 1% влажности называют коэффициентом усушки древесины. Коэффициент усушки

$$K_y = \frac{Y_{\max}}{30},$$

где 30 – среднее значение предела насыщения клеточных стенок в %;

$Y_{\max}$  – максимальная, или полная, усушка, мм.

Определяют максимальную усушку ( $\beta_{\max}$ ) в процентах по формулам:

– для радиального направления

$$\beta_{r \max} = \frac{L_{r \max} - L_{r \min}}{L_{r \max}} \cdot 100; \quad (22)$$

– для тангентального направления

$$\beta_{t \max} = \frac{L_{t \max} - L_{t \min}}{L_{t \max}} \cdot 100; \quad (23)$$

– для направления вдоль волокон

$$\beta_{a \max} = \frac{L_{a \max} - L_{a \min}}{L_{a \max}} \cdot 100; \quad (24)$$

– по объему

$$\beta_{v \max} = \frac{L_{r \max} L_{t \max} L_{a \max} - L_{r \min} L_{t \min} L_{a \min}}{L_{r \max} L_{t \max} L_{a \max}} \cdot 100, \quad (25)$$

где  $L_{r \max}$ ,  $L_{t \max}$ ,  $L_{a \max}$  – размеры образца при влажности, равной или выше предела насыщения клеточных стенок в направлениях соответственно радиальном, тангентальном и вдоль волокон, мм;

$L_{r \min}$ ,  $L_{t \min}$ ,  $L_{a \min}$  – размеры образца в абсолютно сухом состоянии в направлениях соответственно радиальном, тангентальном и вдоль волокон, мм.

Результат округляют с точностью до десятичного знака.

Усушку при уменьшении влажности до нормализованной ( $\beta$ ) в процентах вычисляют по формулам:

для радиального направления

$$\beta_r = \frac{L_{r \max} - L_r}{L_{r \max}} \cdot 100; \quad (26)$$

для тангентального направления

$$\beta_t = \frac{L_{t \max} - L_t}{L_{t \max}} \cdot 100; \quad (27)$$

для направления вдоль волокон

$$\beta_a = \frac{L_{a \max} - L_a}{L_{a \max}} \cdot 100; \quad (28)$$

по объему

$$\beta_v = \frac{L_{r \max} L_{t \max} L_{a \max} - L_r L_t L_a}{L_{r \max} L_{t \max} L_{a \max}} \cdot 100, \quad (29)$$

где  $L_r, L_t, L_a$  – размеры образца при нормализованной влажности в направлениях соответственно радиальном, тангентальном и вдоль волокон, мм.

Нормализованная влажность древесины – равновесная влажность, приобретаемая при  $t = 20 \pm 2^\circ \text{C}$  и влажности среды  $W = 65 \pm 5\%$  (ГОСТ 23431-79).

Результат округляют с точностью до десятичного знака.

Коэффициент усушки ( $K_\beta$ ) в процентах на 1 % влажности вычисляют по формулам:

– для радиального направления

$$K_{\beta r} = \frac{\beta_r \max}{W_n}; \quad (30)$$

– для тангентального направления

$$K_{\beta t} = \frac{\beta_t \max}{W_n}; \quad (31)$$

– для направления вдоль волокон

$$K_{\beta a} = \frac{\beta_a \max}{W_n}; \quad (32)$$

– по объему

$$K_{\beta v} = \frac{\beta_v \max}{W_n}, \quad (33)$$

где  $W_n$  – предел насыщения клеточных стенок древесины, %, принимаемый равным 30 %.

Результат округляют с точностью до второго десятичного знака на 1 % влажности.

### 3.3. Водопоглощение и разбухание древесины

#### 3.3.1. Водопоглощение

Водопоглощением называется способность древесины впитывать воду в полости клеток при непосредственном контакте с водой [1].

Максимальная влажность, которую достигает погруженная в воду древесина, складывается из предельного количества связанной влаги (предел гигроскопичности) и наибольшего количества свобод-

ной влаги. Количество свободной влаги зависит от объема полостей в древесине. Чем больше плотность древесины, тем меньше объем полостей, тем меньше ее влажность. Максимальная влажность может быть подсчитана по формуле, %:

$$W_{\max} = 30 + \frac{1,54 - \rho_o}{1,54 \rho_o} 100, \quad (34)$$

где  $\rho_o$  – плотность в абсолютно сухом состоянии, г/см<sup>3</sup>;

1,54 – плотность древесинного вещества, г/см<sup>3</sup>;

30 – влажность при пределе гигроскопичности, %.

Формула эта приближенная, так как гигроскопическая влажность 30% и плотность древесинного вещества взята для средних значений. Так, для древесины сосны

$$W_{\max} = 30 + \frac{1,54 - 0,47}{1,54 \cdot 0,47} 100 = 177,83\%.$$

Водопоглощение зависит от породы, начальной влажности, температуры, а также от формы и размеров образца. Так, водопоглощение ядровой древесины меньше, чем заболонной; с увеличением плотности водопоглощение уменьшается. Форма образца имеет существенное значение для скорости поглощения: поглощение воды происходит главным образом через торцовые поверхности, поэтому образцы с большой торцовой поверхностью поглощают воду значительно быстрее. Для определения водопоглощения используются образцы размером 30×30×10 мм (ГОСТ 16483.20-72). Высушенные до абсолютно сухого состояния образцы погружают в сосуд с водой и во время выдерживания периодически взвешивают через все возрастающие промежутки времени (2 ч – 1, 2, 4, 7, 12, 20 суток и далее через каждые 10 суток). По результатам периодических взвешиваний  $m_w$  и известной массе образцов в абсолютно сухом состоянии  $m_o$  определяют текущую влажность в процессе водопоглощения, %:

$$W = \frac{m_w - m_o}{m_w} 100. \quad (35)$$

Обычно эксперимент заканчивают после 30 суток выдерживания. Однако в некоторых случаях выдерживание продолжают дальше, проводя взвешивание через каждые 10 суток до тех пор, пока приращение влажности за указанное время окажется менее 5 %.

По результатам определения текущей влажности строят диаграмму водопоглощения древесины в координатах «влажность древесины – продолжительность выдерживания» (рис. 18). За основной показатель водопоглощения принимают влажность, достигнутую древесиной при выдерживании в воде в течение 30 суток.

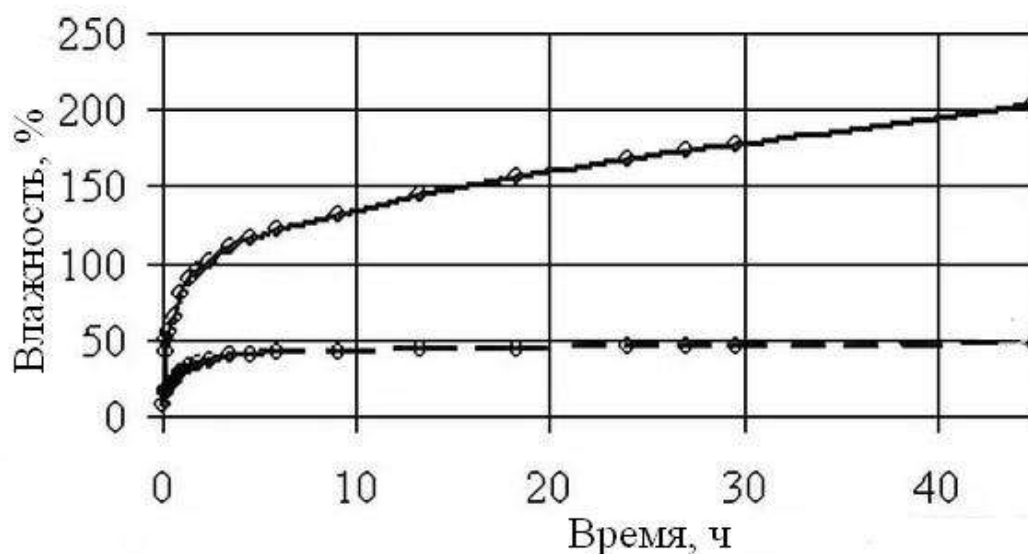


Рис. 18. Изменение влажности древесины:  
1 – ранней; 2 – поздней

Закономерности водопоглощения используются при выполнении технологических операций пропитки древесины антисептиками и антипиренами.

### 3.3.2. Разбухание древесины

При увлажнении древесины в результате увеличения содержания связанной влаги микрофибриллы в клеточных оболочках раздвигаются.

Микрофибриллы – это структурные элементы клеточной стенки, имеющие толщину 5...10 нм, ширину 10...30 нм, длину несколько микрометров.

Увеличивается размер и объем анатомических элементов, происходит разбухание. Мерой разбухания является влажностная деформация, отнесенная к размеру образца в абсолютно сухом состоянии, %:

$$P_w = \frac{a_w - a_o}{a_o} 100, \quad (36)$$

где  $P_w$  – разбухание образца при данной влажности  $W$ , %;

$a_w$  – размер (объем) образца при данной влажности  $W$ , мм (мм<sup>3</sup>);

$a_o$  – размер (объем) образца в абсолютно сухом состоянии ( $W=0\%$ ), мм (мм<sup>3</sup>).

Полное разбухание  $P$  наступает при увлажнении древесины от абсолютно сухого состояния до предела гигроскопичности. Дальнейшее увеличение влажности древесины вследствие повышения содержания свободной влаги разбуханием не сопровождается.

Объем разбухшей древесины получается несколько меньше суммы объемов древесины до разбухания и поглощаемой ею воды. Объясняется это сжатием (уплотнением) воды. Вода в оболочке клеток находится под давлением 300...400 МПа и имеет повышенную плотность.

Коэффициент разбухания определяется по формуле:

$$K = \frac{P_w}{W}, \quad (37)$$

$W$  – влажность образца в области до  $W=30\%$ .

Разбухание широко используется в производстве деревянных бочек для хранения жидких товаров, деревянных труб, судов и т.

### 3.3.3. Паропроницаемость древесины

**Паропроницаемость** – это способность древесины пропускать водяной пар в результате разности парциального давления водяного пара (давление пара при отсутствии других газов в системе) с учетом одинакового атмосферного давления с обеих сторон.

Это величина  $P$ , численно равная количеству водяного пара в миллиграммах, проходящего за 1 ч через слой материала площадью  $1 \text{ м}^2$  и толщиной 1 м при условии, что температура воздуха у противоположных сторон слоя одинакова, а разность парциального давления водяного пара равняется 1 Па [12].

**Коэффициент паропроницаемости** – это величина, которая равна плотности стационарного потока водяного пара проходящего в изотермических условиях (при постоянной температуре) через слой материала толщиной в один метр в единицу времени при разности парциального давления в 1 Па обозначается  $\mu$ , мг/(м·час·Па) [12].

Сопротивление паропроницанию – показатель, характеризующий разность парциальных давлений водяного пара в Паскалях у противоположных сторон изделия с плоскопараллельными сторонами, при которой через стену площадью  $1 \text{ м}^2$  за 1 ч проходит 1 мг водяного пара при равенстве температуры воздуха у противоположных сторон изделия. Это есть величина, численно равная отношению толщины слоя испытуемого материала к значению паропроницаемости,  $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}$ :

$$q = \frac{H}{\mu}. \quad (38)$$

Указанные понятия используются при расчете сопротивления паропроницанию, например, стен деревянного дома.

Часто люди, живущие в деревянном доме утверждают, что в таком доме жить легко, так как стены его «дышат». Материал деревянной стены пропускает не только воздух, но и пар. Действительно, по сравнению с другими строительными материалами древесина обладает хорошей паропроницаемостью (рис. 19).

Сопротивление паропроницаемости стен различных строительных материалов показано в табл. 8.

Древесина сосны и древесные материалы обладают хорошей паропроницаемостью. Кирпич тоже пропускает пары и воздух, но меньше, чем древесные материалы.

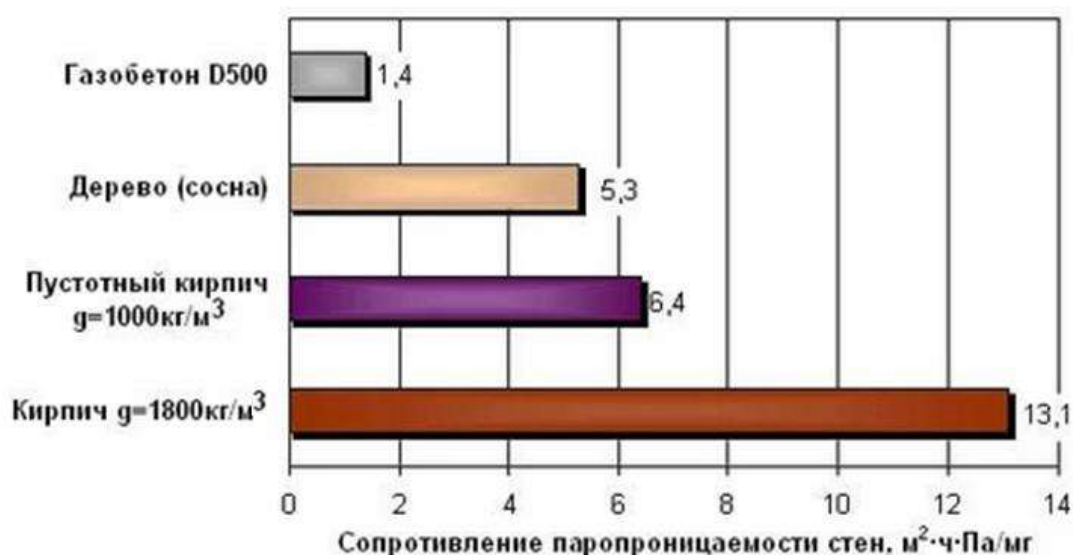


Рис. 19. Сопротивление паропроницаемости стен различных строительных материалов

Таблица 8

Коэффициент паропроницаемости древесных строительных материалов

Материал	Коэффициент паропроницаемости $\mu$ , $\text{мг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$
Сосна, ель поперек волокон .....	0,06
Сосна, ель вдоль волокон .....	0,32
Дуб поперек волокон .....	0,05
Дуб вдоль волокон .....	0,30
Фанера клееная .....	0,02
ДСП и ДВП, $1000-800 \text{ кг/м}^3$ .....	0,12
ДСП и ДВП, $600 \text{ кг/м}^3$ .....	0,13
ДСП и ДВП, $400 \text{ кг/м}^3$ .....	0,19
ДСП и ДВП, $200 \text{ кг/м}^3$ .....	0,24

Образующийся в доме пар, выдыхаемый человеком, выделяемый при приготовлении пищи, принятии ванной, создает повышенную влажность в доме. Его заметно в виде конденсата на стеклах окон, например. Можно предположить, если стена имеет высокую паропроницаемость, то в доме образуется хороший микроклимат и легко дышится.



На самом деле это не совсем так. Замечено, что 97% пара удаляется из помещений через вытяжные устройства, и только 3% – через стены. Стены деревянного дома дышат, но незначительно. И при таком дыхании в ветреную холодную погоду из дома выдувается тепло. А ещё дышащие стены менее долговечны. Чем выше паропроницаемость материала, тем больше он может набрать влаги. Пар, выходя из дома через стену, на холоде превращается в воду и даже замерзает, превращается в лед.

Образующийся лед всегда занимает больший объем, чем капельки воды. При расширении льда происходит частичное разрушение материала. Несколько сотен таких циклов приводят к полному разрушению материала. Поэтому паропроницаемость древесины, используемой в строительстве домов, свойство не только бесполезное, но и вредное.

В идеале конструкцию стены дома нужно проектировать таким образом, чтобы точка замерзания влаги приходилась на такой утеплитель, который защищен от проникновения влаги. В качестве примера такого материала можно привести утеплитель пеноплекс или утеплитель из минеральной ваты с использованием паронепроницаемой пленки, защищающей утеплитель от проникновения влаги (рис. 20).

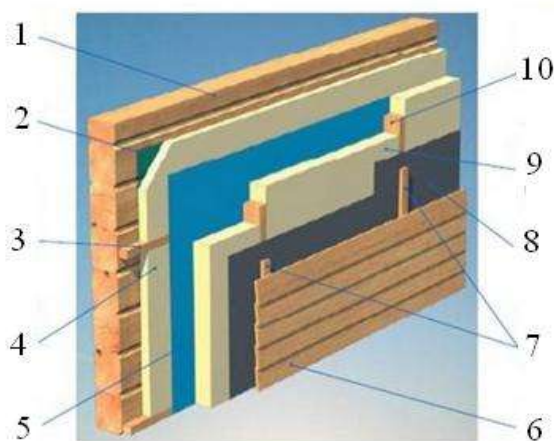


Рис. 20. Схема утепления стены:

- 1 – стена; 2 – слой антисептика; 3 – бруски деревянные; 4 – утеплитель;
- 5 – пароизоляционная пленка; 6 – облицовка; 7 – рейки;
- 8 – ветроизоляционная пленка; 9 – утеплитель;
- 10 – бруски вертикальные

### 3.4. Деформативность древесины

Деформативность – способность древесины изменять свои размеры и форму при внешних воздействиях нагрузки, влажности, температуры. Поперечное коробление связано с различной усушкой (разбуханием) древесины в радиальном и тангенциальном направлениях (рис. 19). Его характер зависит от расположения годичных слоев, обусловленных формой поперечного сечения сортимента, а также местом выпиловки его из бревна. Продольное коробление связано с некоторыми пороками древесины, например крупные сучки, кренью, наклонном волокон. Следствием коробления является порок древесины – покоробленность (поперечная, продольная по пласти и по кромке, крыловатость).

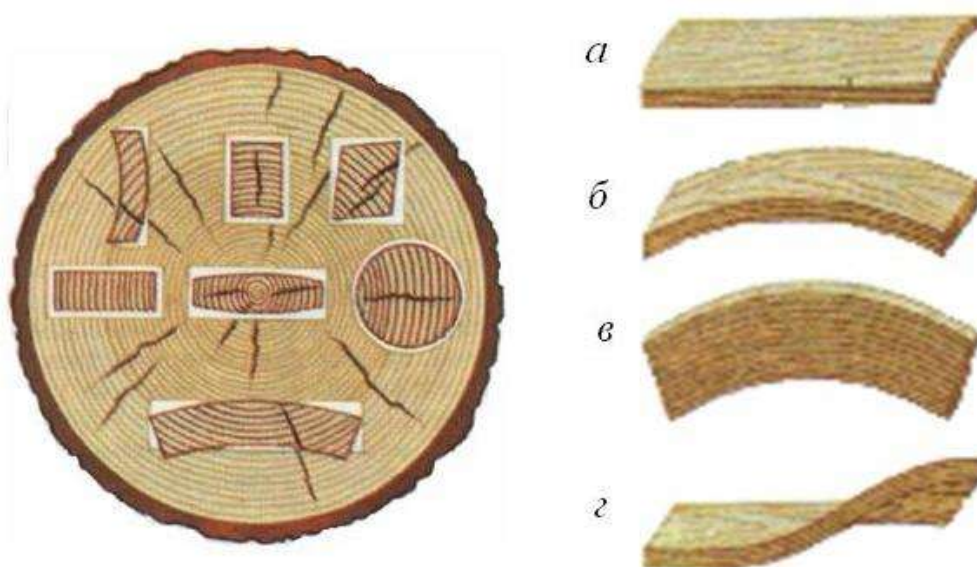


Рис. 19. Место вырезанных образцов и их покоробленность при высыхании:

*а*– поперечная; *б* – продольная по пласти;  
*в* – продольная по кромке; *г* – крыловатость

Поперечная и продольная покоробленности возникают также из-за нарушения равновесия остаточных напряжений в высушенных пиломатериалах при механической обработке: одностороннем фрезеровании, ребровом делении толстых досок на тонкие.

Продольная покоробленность досок наблюдается при распиловке бревен вследствие остаточных внутренних напряжений роста.

## 4. Тепловые свойства древесины

### 4.1. Теплоемкость

**Теплоемкостью**  $C$  тела называется отношение количества теплоты, сообщаемого телу в каком-либо процессе, к соответствующему изменению температуры тела [3].

Это способность древесины аккумулировать тепло и отдавать его.

$$C = \frac{Q}{\Delta_t}, \quad (39)$$

Показателем теплоемкости служит *удельная теплоемкость*  $c$ , Дж/кг·град. Удельной теплоемкостью называют теплоемкость единицы массы однородного вещества. Удельная теплоемкость выражается количеством тепла, получаемого 1 кг древесины при нагреве ее на 1 °С.

$$c = \frac{Q}{m\Delta_t}, \quad (40)$$

где  $Q$  – количество тепла, полученное деревянным образцом при нагреве, Дж;

$m$  – масса нагреваемого образца, кг;

$\Delta_t$  – разность конечной и начальной температуры образца, град.

Поскольку состав древесинного вещества у всех пород одинаков, удельная теплоемкость древесины не зависит от породы. При температуре 0 °С для абсолютно сухой древесины удельная теплоемкость равна 1550 Дж/(кг·°С). С повышением температуры удельная теплоемкость несколько возрастает по линейному закону. С увеличением влажности древесины от 0 до 130 % удельная теплоемкость увеличивается в 2 раза.

Для сухой и свежесрубленной древесины при температуре 20°C удельная теплоёмкость равняется 1700...2000 и 2600...3000 Дж/(кг·°C) соответственно. От породы древесины удельная теплоёмкость не зависит.

## 4.2. Теплопроводность

**Теплопроводность** – способность материальных тел к переносу энергии (теплообмену) от более нагретых частей тела к менее нагретым частям тела. Такой теплообмен происходит во всех телах с неоднородным распределением температур.

Количественно теплопроводность характеризуется *коэффициентом теплопроводности*  $\lambda$ , Вт/м·°C, который выражается количеством тепла в калориях, проходящем в течение 1 часа через пластину площадью 1 м<sup>2</sup>, толщиной 1 м при разности температур с обеих сторон пластин в 1°C. Коэффициент теплопроводности имеет размерность Вт/(м·°C)= Вт/(м·K).

Количество тепла, передаваемое деревянной заготовке, можно определить по уравнению Фурье  $Q$ , Дж [3]:

$$Q = \lambda F \tau \frac{\Delta_t}{\Delta_x}, \quad (41)$$

где  $F$  – площадь сечения перпендикулярного тепловому потоку, м<sup>2</sup>;

$\tau$  – продолжительность нагрева, с;

$\Delta_t$  – перепад температур, °C;

$\Delta_x$  – расстояние между начальной и конечной точками нагрева, м.

Мы все знакомы на бытовом уровне с теплопроводностью дерева. Древесина известна своими качествами теплоизоляции. Образ «тёплого» дерева вполне объясним с точки зрения теории теплопроводности. Ощущение теплоты или холода зависит не только от температуры предмета, к которому мы прикасаемся, но и от скорости, с которой он передаёт или отбирает тепло нашей кожи. К примеру, если вы касаетесь холодного металла, то он отбирает тепло в сотни раз быстрее, чем холодное дерево. Хотя их температура и одинакова, ваши

ощущения таковы: дерево теплее. Именно поэтому в течение многих столетий дерево используют в качестве материала для изготовления ружейного ложа, сидений и рукояток инструмента.

Древесина обладает слабой теплопроводностью, особенно в сухом состоянии (табл. 9).

Таблица 9

Теплопроводность различных древесных материалов  
(в воздушно сухом состоянии)

Порода древесины, древесный материал	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , ккал/м <sup>2</sup> · час· °С	
	поперек волокон	вдоль волокон
Балинит	0,15	0,20
Дельта-древесина	0,13	0,17
Дуб	0,20	0,35
Ель	0,13	0,31
Клен	0,15	0,37
Сосна	0,13	0,31
Уплотненная древесина	—	0,32

С повышением плотности и влажности теплопроводность ее повышается. Так, например, при увеличении влажности древесины с 5 до 15% коэффициент теплопроводности увеличивается на 10%. В направлении волокон теплопроводность древесины обычно больше, чем в направлении поперек волокон.

Свойство теплопроводности используют на практике, например, при склеивании деревянных заготовок (рис. 20). Для ускорения процесса склеивания клеевой слой стремятся нагреть и сжать, помещая склеиваемые заготовки между горячими плитами пресса. Используя формулу (41), нетрудно доказать, что чем меньше расстояние в пакете от горячей плиты до клеевого слоя, тем быстрее произойдет прогрев до заданной температуры. Склеиваемые заготовки должны быть тонкими. Так склеивают фанеру, плиты.

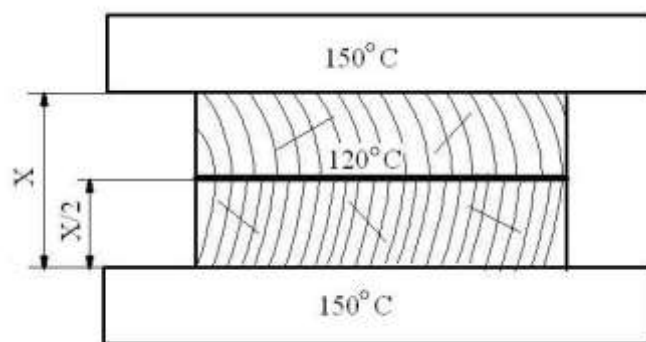


Рис. 20. Положение склеиваемого пакета в плитах пресса

### 4.3. Температуропроводность

**Температуропроводность  $\alpha$**  характеризует нестационарный перенос теплоты в древесине, т.е. ее тепловую инерцию при изменении температуры, и выражается в м<sup>2</sup>/с:

$$\alpha = \frac{\lambda}{C\rho}, \quad (42)$$

где  $\rho$  – плотность древесины, кг/м<sup>3</sup>.

Значение температуропроводности древесины поперек волокон, например сосны с условной плотностью 400 кг/м<sup>3</sup> при температуре 20 °С, составляет  $(1,8-1,9)10^{-7}$  и  $(1,5-1,8)10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с соответственно для сухой с свежесрубленной древесины. При нагреве древесина увеличивается в объеме. Температурный коэффициент линейного расширения  $\alpha$  – характеризует тепловое расширение древесины и выражается в 1/°С. Диапазон изменения  $\alpha$  вдоль волокон равен  $(2,5-5,4)10^{-6}$  1/°С, а поперек волокон – на порядок выше, причем в тангенциальном направлении в 1,5-1,8 раза больше, чем в радиальном.

Теплопроводность  $\lambda$  древесины характеризует стационарный перенос теплоты в древесине, т.е. ее теплоизоляционную способность, и выражается в Вт/(м · °С). Она возрастает с повышением влажности, температуры и плотности, а также зависит от ее строения (породы) и направления теплового потока. Вдоль волокон теплопроводность примерно в 2 раза выше, чем поперек. Значение  $\lambda$  древесины поперек волокон, например сосны с условной плотностью 400 кг/м<sup>3</sup>

при температуре 20°C, составляет 0,15...0,19 и 0,28...0,33 Вт/ (м ·°C) соответственно для сухой с свежесрубленной древесины.

#### 4.4. Тепловое расширение

**Тепловое расширение** древесины характеризуется коэффициентом линейного расширения. Коэффициент линейного расширения у древесины в различных направлениях различен (табл. 10), наименьшее его значение вдоль волокон ( $11 \cdot 10^{-7} \dots 65 \cdot 10^{-7}$ ) град<sup>-1</sup>, наибольшее в тангентальном направлении ( $27 \cdot 10^{-6} \dots 61 \cdot 10^{-6}$ ) град<sup>-1</sup>.

Таблица 10

Коэффициенты линейного расширения древесины

Порода дерева	Коэффициенты линейного расширения в направлении, $\alpha \cdot 10^{-7}$ град <sup>-1</sup>			
	продольном $\alpha$	поперечном $\alpha$	радиальном $\alpha$	тангентальном $\alpha$
Береза желтая	25	—	272	300
Граб	60	—	—	—
Дуб	36	—	293	419
Ель	54	341	—	—
Каштан	65	325	—	—
Красное дерево	36	405	—	—
Липа	54	444	—	—
Пихта	37	584	—	—
Сосна	51	—	514	—
Тюльпанное дерево	17	—	242	267
Ясень	11	—	—	—

Вдоль волокон коэффициент линейного расширения древесины имеет небольшое значение, а поперек волокон – очень большое.

Изменением размеров древесины от нагревания практически можно пренебречь, так как ввиду незначительности коэффициента линейного расширения оно намного меньше изменений ее размеров от усушки или разбухания.

#### 4.5. Термическое сопротивление древесины

**Термическим сопротивлением древесины** называют способность ее препятствовать распространению теплового движения молекул. Это свойство древесины имеет исключительное значение в домостроении.

**Сопротивление теплопередаче** представляет собой способность стены толщиной  $H$  препятствовать потерям тепла,  $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ :

$$R = \frac{H}{\lambda}, \quad (43)$$

где:  $H$  – толщина деревянной стены, м;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$  (табл. 11).

Таблица 11

Коэффициенты теплопроводности  $\lambda$  древесины  
различных пород,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$

Порода древесины	$\lambda$	Порода древесины	$\lambda$
Береза .....	0,15	Лиственница .....	0,13
Дуб (поперек волокон)	0,20	Липа .....	0,15
Дуб (вдоль волокон)	0,40	Пихта .....	0,15
Ель .....	0,11	Сосна (поперек волокон)	0,15
Кедр .....	0,095	Сосна (вдоль волокон)	0,40
Клен .....	0,19	Тополь .....	0,17

Термосопротивление используют на практике при проектировании толщины стен деревянного дома. Обычно поступают так. Толщину стены дома выбирают с учетом климатических условий региона. Для Московской области, например, для строительства дома исполь-



зуют брус толщиной 190...195 мм или из бревна диаметром более 22 см. Для Свердловской области, стену дома можно сделать из бруса толщиной 200 мм или из бревен диаметром 24...32 см. Иногда стены дополнительно утепляют несколькими слоями теплоизоляционных материалов.

**Климатические условия.** Для определения сопротивления теплопередаче необходимо знать климатические условия в заданном регионе. Эти условия характеризуются величиной температуры наиболее холодной пятидневки, определенной с вероятностью 92% ( $t_{92}$ ), средней температуры за отопительный сезон ( $t_{\text{отоп. пер}}$ ) и продолжительностью отопительного сезона ( $z_{\text{отоп. пер}}$ ).

Важной величиной является «градусо-сутки отопительного периода» (ГСОП), которая определяется как [13]:

$$ГСОП = (t_{вв} - t_{\text{отоп. пер}}) z_{\text{отоп. пер}}, \quad (44)$$

где  $t_{вв}$  – средняя температура воздуха внутри жилого помещения, принимается равной 20°C.

Климатические параметры холодного периода года для городов России приведены в работе [13], для г. Екатеринбурга, например:

- температура наиболее холодной пятидневки, 92%,  $t_{92} = 32$  °C;
- средняя температура отопительного периода,  $t_{\text{отоп. пер}} = -5,4$  °C;
- продолжительность отопительного периода,  $z_{\text{отоп. пер}} = 221$  сут.

Базовое, нормированное значение сопротивления теплопередаче  $R_{\text{норм}}$  находится так [13],  $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$ :

$$R_{\text{норм.}} = a \cdot ГСОП + b, \quad (45)$$

где  $a, b$  – коэффициенты [33],  $a = 0,00035$ ,  $b = 1,4$ .

Зная нормированное значение сопротивления теплопередаче  $R_{\text{норм}}$ , по формуле (43) можно найти толщину стены  $H$ . Если стена дома сделана из бруса, то толщина стены равна толщине бруса. Если стена сделана из оцилиндрованных бревен, то среднее значение толщины дома равно

$$H_{\text{ср}} = 0,85d .$$

## 5. Электрические свойства древесины

### 5.1. Электропроводность древесины

Электропроводностью называют способность древесины проводить электрический ток. Она зависит от электрического сопротивления, которое складывается из двух сопротивлений: объемного и поверхностного. Объемное сопротивление препятствует прохождению тока через объем материала, а поверхностное – по поверхности материала. Объемное сопротивление измеряют в Ом·см, поверхностное – в Ом. Сравнительные данные сопротивлений приведены в табл. 12.

Таблица 12

Объемное и поверхностное сопротивление древесины

Порода и направление	Влажность, %	Удельное электрическое сопротивление	
		объемное, Ом·см	поверхностное, Ом
Береза вдоль волокон	8,2	$4,2 \cdot 10^{10}$	$4,0 \cdot 10^{11}$
Береза поперек волокон	8,0	$8,6 \cdot 10^{11}$	$2,8 \cdot 10^{12}$
Бук вдоль волокон	9,2	$1,7 \cdot 10^9$	$9,4 \cdot 10^{10}$
Бук поперек волокон	8,3	$1,4 \cdot 10^{10}$	$7,9 \cdot 10^{10}$

**Удельное электрическое сопротивление**, или просто удельное сопротивление древесины – физическая величина, характеризующая ее способность препятствовать прохождению электрического тока.

Удельное электрическое сопротивление  $\rho$  (объемное и поверхностное) зависит от породы, направления волокон (вдоль волокон оно меньше, чем поперек), влажности и температуры. Сухая древесина по значению  $\rho$  не уступает лучшим электроизоляционным материалам. С ростом влажности от нуля до точки насыщения клеточных стенок значение  $\rho$  резко снижается. С дальнейшим ростом влажности снижение  $\rho$  продолжается, но в меньшей мере.

Электрическое сопротивление определяют по формуле, Ом:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (46)$$

где  $l$  – длина проводника, м;

$S$  – площадь поперечного сечения проводника,  $\text{м}^2$ .

Удельное электрическое сопротивление древесины некоторых пород при  $20^\circ\text{C}$ , Ом·см, приведено в табл. 13.

Таблица 13

Удельное электрическое сопротивление при  $20^\circ\text{C}$ , Ом·см

Порода	Влажность, %			
	0		7	20
	поперек волокон	вдоль волокон	поперек волокон	поперек волокон
Сосна	$2,3 \cdot 10^{15}$	$1,8 \cdot 10^{15}$	$5 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^8$
Ель	$7,6 \cdot 10^{16}$	$3,8 \cdot 10^{16}$	$1 \cdot 10^{12}$	$3 \cdot 10^8$
Ясень	$3,3 \cdot 10^{16}$	$3,8 \cdot 10^{15}$	-	-
Граб	$8,0 \cdot 10^{15}$	$1,3 \cdot 10^{15}$	-	-
Клен	$6,6 \cdot 10^{17}$	$3,3 \cdot 10^{17}$	-	-
Береза	$5,1 \cdot 10^{16}$	$2,3 \cdot 10^{16}$	$9 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^8$
Ольха	$1,0 \cdot 10^{17}$	$9,6 \cdot 10^{15}$	$9 \cdot 10^{11}$	$6 \cdot 10^8$
Липа	$1,5 \cdot 10^{16}$	$6,4 \cdot 10^{15}$	-	-
Осина	$1,7 \cdot 10^{16}$	$8,0 \cdot 10^{15}$	-	-
Дуб	$1,5 \cdot 10^{16}$	-	$2 \cdot 10^{11}$	$7 \cdot 10^8$

## 5.2. Электрическая прочность древесины

Электрическая прочность древесины как электроизолирующего материала характеризуется пробивным напряжением в вольтах на 1 см толщины материала. Она имеет небольшое значение и зависит от породы древесины, влажности, температуры и направления. С увеличением влажности и температуры она снижается; вдоль волокон она значительно ниже, чем поперек (табл. 14).

Электрическая прочность древесины – напряженность однородного электрического поля, при которой происходит электрический пробой древесины. Ее определяют отношением пробивного напряжения к толщине образца и измеряют в кВ/мм.

Таблица 14

Электрическая прочность древесины вдоль и поперек волокон,  
кВ на 1 см толщины при влажности 7,5-9%

Порода	Влажность, %	Вдоль волокон	Поперек волокон в направлении	
			радиальном	тангенциальном
Бук	7,5-9	14,0	41,5	52,0
Береза	7,5-9	15,2	59,8	–
Ольха	7,5-9	–	56,4	60,5
Дуб	7,5-9	–	39,1	47,0
Сосна	10	16,8	59,1	77,3

Электрическая прочность древесины вдоль волокон примерно в 3,5 раза меньше, чем поперек волокон. В радиальном направлении прочность меньше, чем в тангенциальном, так как сердцевинные лучи уменьшают пробивное напряжение. Повышение влажности с 8 до 15% снижает электрическую прочность поперек волокон примерно в 3 раза.

### 5.3. Диэлектрические свойства древесины

#### 5.3.1. Диэлектрическая проницаемость

Древесина, находящаяся в переменном электрическом поле, проявляет свои диэлектрические свойства, которые характеризуются двумя показателями. Первый из них – *диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$* .

*Диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$*  количественно равна отношению емкости конденсатора с прокладкой из древесины к емкости конденсатора с воздушным зазором между электродами:

$$\varepsilon = \frac{C_{др}}{C_{вк}} = \frac{\varepsilon_{др}}{\varepsilon_{вк}}. \quad (47)$$

Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  некоторых пород древесины приведена ниже в табл. 15.

Таблица 15

Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$

Порода	Ель	Бук	Дуб
вдоль волокон	3,06	3,18	2,86
в радиальном направлении	1,98	2,20	2,30
в тангенциальном направлении	1,91	2,40	2,46

### 5.3.2. Тангенс угла диэлектрических потерь

Показатель, *тангенс угла диэлектрических потерь*  $\operatorname{tg} \delta$ , определяет долю подведенной мощности, которая вследствие дипольной поляризации древесины поглощается ею и превращается в теплоту.

Угол  $\delta$  называется углом диэлектрических потерь. Чем больше угол  $\delta$ , тем больше рассеиваемая мощность.

Древесина состоит из клеток веретенообразной формы, вытянутых вдоль ствола. Это разные по назначению клетки: механические (опорные), проводящие, запасающие. Опорные клетки вытянуты в длину с заостренными концами, называют древесными волокнами. Внутри клетки расположена вытянутая узкая полость. Оболочка клетки состоит из тонких волокон (нитей) скрученных между собой как нити каната. Так обеспечивается их прочность.

Древесина по своей природе является диэлектриком, не проводящим электрического тока. В ней отсутствуют свободные электрические заряды. По своим электрическим свойствам молекулы древесины эквивалентны электрическим диполям, которые в свободном состоянии расположены хаотично. В молекулах древесины центры распределения положительных и отрицательных зарядов не совпадают (рис. 21).

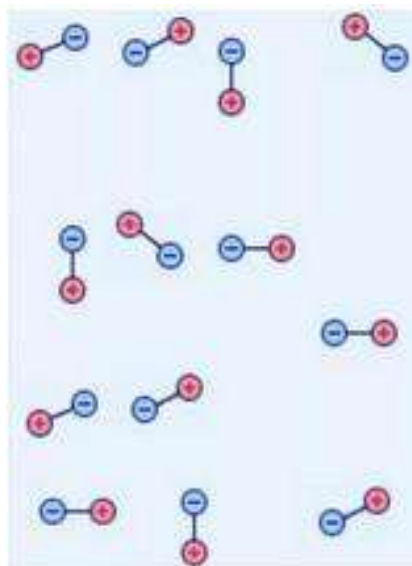


Рис. 21. Молекулы древесины

При помещении диэлектрика во внешнее электрическое поле молекулы своими зарядами стремятся развернуться. Но молекулы скручены между собой как канаты и могут только частично повернуться. Происходит деформация молекул и возникает индуцированный дипольный электрический момент молекул, пропорциональный напряженности поля. Происходит поляризация молекул.

Если внешнее электрическое поле создать переменным током высокой частоты, то направление деформации молекул будет следовать за направлением магнитного поля. При этом процесс ориентации сопровождается трением и соударением молекул, затраченная на это работа превращается в тепло.

Чем больше напряжение поля, тем больше угол поворота диполей; чем больше частота тока, тем чаще меняется направление поля, тем чаще молекулы меняют свое положение и тем интенсивнее нагревается диэлектрик. Диэлектрическая проницаемость абсолютно сухой древесины сравнительно мало зависит от ее плотности.

Диэлектрическая проницаемость поперек волокон абсолютно сухой древесины средней плотности составляет примерно 1,8...2,2. Вдоль волокон диэлектрическая проницаемость в 1,5...2 раза больше, чем поперек.

С повышением влажности древесины диэлектрическая проницаемость увеличивается, так как  $\varepsilon$  воды равняется 81.

Тангенс угла диэлектрических потерь древесины зависит от ее плотности. Поскольку потери в древесинном веществе значительно выше, чем в воздухе, с увеличением плотности древесины  $\operatorname{tg}\delta$  возрастает. Так же, как и диэлектрическая проницаемость,  $\operatorname{tg}\delta$  вдоль волокон примерно в 2 раза больше, чем поперек (разницы между тангенциальным и радиальным направлением практически не наблюдается). Повышение частоты влияет на величину  $\operatorname{tg}\delta$ .

При исследовании диэлектрических свойств в широком диапазоне частот от  $3 \cdot 10^2$  до  $10^9$  Гц, были обнаружены весьма сложные зависимости  $\operatorname{tg}\delta$  от частоты при разной влажности древесины. Так, например, для древесины бука вдоль волокон при влажности 12 % с повышением частоты  $\operatorname{tg}\delta$  вначале резко падает, достигает минимума при частоте  $10^5$  Гц и затем также резко возрастает.

### 5.3.3. Практическое применение

Выделение тепла диэлектриком, помещенным в поле токов высокой частоты (ТВЧ) используется на практике, например, при сушке древесины (рис. 22), при склеивании деталей (рис. 23) и др.

При склеивании древесины необходимо, чтобы клеевые слои были нагреты, лучше всего до температуры 120 °С. Склеивание возможно и при холодных клеевых слоях, только продолжительность склеивания удлиняется до суток. При горячем склеивании продолжительность процесса заканчивается за несколько секунд.

Положение заготовок между пластинами конденсатора при склеивании возможно параллельное и поперечное.

**При параллельном нагреве** клеевые слои параллельны силовым линиям электрического поля (рис. 23,а) и перпендикулярны электродам. В этом случае в основном разогреваются клеевые слои, примерно в 14 раз быстрее, чем древесина. Однако этот способ нагрева возможен только в случае, если ширина клеевого слоя не превосходит 76 мм, а расстояние между электродами не более 300 мм. В противном случае в средней части клеевого слоя будут дефекты

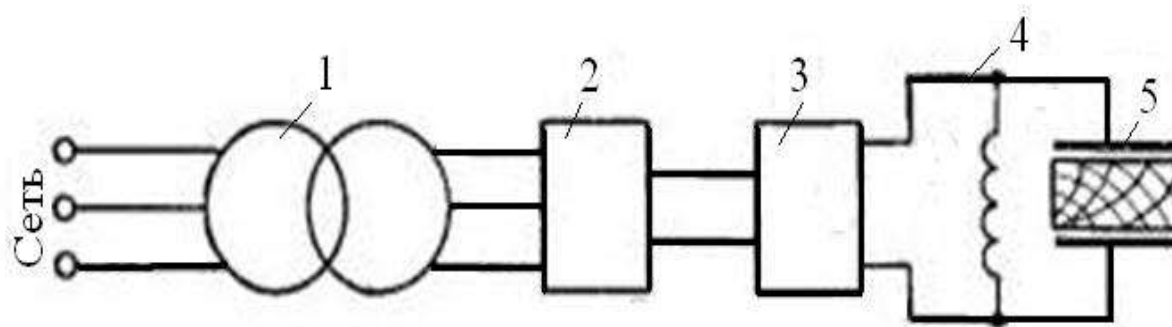
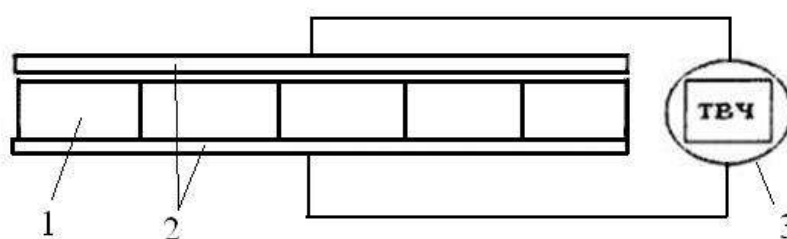


Рис. 22. Нагреватель ТВЧ для сушки древесины:

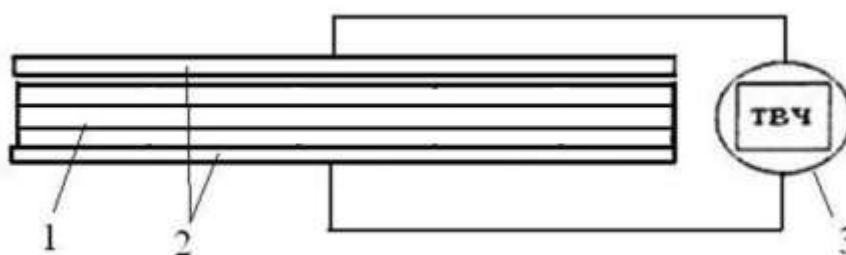
1 – трансформатор; 2 – выпрямитель; 3 – генератор;

4 – колебательный контур; 5 – конденсатор

**При поперечном нагреве** клеевые слои располагают параллельно поверхностям электродов и силовые линии электрического поля направлены перпендикулярно слоям. В этом случае прогревается весь склеиваемый материал. Такой нагрев применяется, например, при производстве фанеры.



*а*



*б*

Рис. 23. Нагрев клеевых слоев в поле ТВЧ:

*а* – поперечное положение склеиваемых заготовок;

*б* – параллельное положение склеиваемых заготовок;

1 – склеиваемые заготовки; 2 – пластины конденсатора;

3 – генератор



## 6. Звуковые свойства древесины

### 6.1. Звук

Звук представляет собой механические волновые колебания в упругих средах и характеризуется амплитудой и спектром частот.

Звуковые колебательные волны вызываются вибрацией любых тел. При возникновении звуковой волны (рис. 24) происходит изменение плотности или давления воздуха, перемещение частиц воздушных масс.

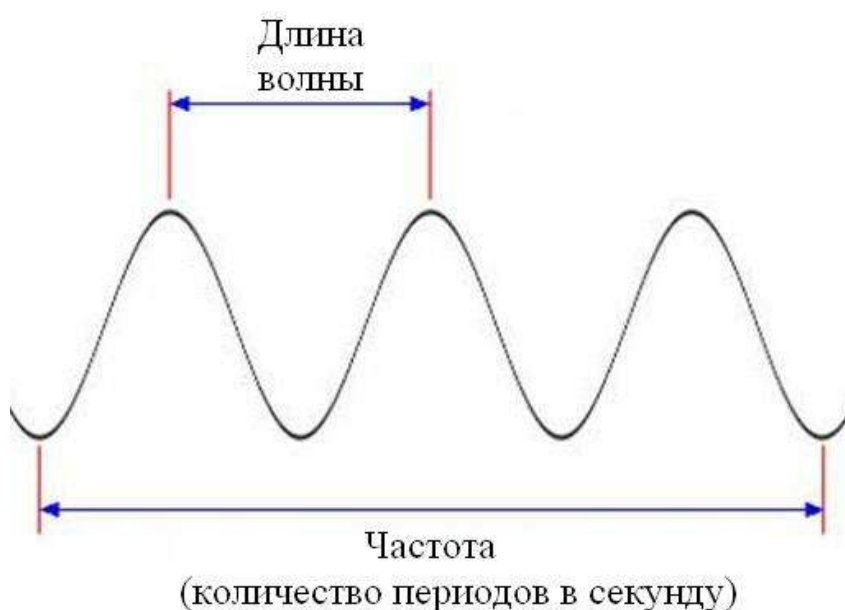


Рис. 24. Характеристика звуковой волны

Одной из характеристик звуковой волны является частота. **Частота** измеряется в Герцах (в честь немецкого физика Генриха Рудольфа Герца) и показывает количество колебаний за одну секунду:  $1 \text{ Гц} = 1 \text{ колебанию в секунду}$ .

Другой характеристикой служит длина волны. **Длиной волны** принято считать расстояние, которое проходит звук определённой частоты за время одного колебания. Для примера, длина волны самого низкого звука в слышимом диапазоне для человека частотой 20 Гц составляет 16,5 метров, а длина волны самого высокого звука 20000 Гц составляет 1,7 сантиметра.

Для человеческого уха звук частотой:  
 – 0,001...16 Гц – инфразвук – не слышен;  
 – 16...20 Гц (с длиной волны от 20 м до 17 мм) – слышимый звук; частота обычного человеческого голоса 100...300 Гц;  
 – от 20 кГц до 100 кГц – ультразвук, неслышен [3].

Громкость звука измеряют в децибелах (дБ). Влияние звука на слуховой аппарат человека показано ниже (табл. 16).

Таблица 16

Влияние громкости звука на человека

Источник	Гром- кость (дБ)	Состояние человека	Источник	Гром- кость (дБ)	Состояние человека
Дыхание человека	10–20	Слишком тихо	Работа пы- лесоса	75	-
Тихий шёпот	20–30	Комфорт- ное со- стояние	Большая улица	70–80	Индивиду- ально
Неболь- шой офис	30–40	-	Детский плач	70–85	-
Спокой- ный раз- говор	40–50	-	Игра на пиа- нино	80–85	-
Работа телевизо- ра	50–70	-	Движущий электропо- езд в метро- политене	90	-
Громкий разговор выкрики	60–70	-	Дисотека	120	Приводит к нервным рас- стройствам и ухудшению слуха

Громкость звука определяется амплитудой колебаний, которая, в свою очередь, связана с энергией звуковой волны. Понятие «сила», или «интенсивность», звука  $J$  - это энергия звуковой волны, проходящая через единицу площади в единицу времени [14]. Порог слыши-  
мости  $J_0$  составляет около 10-12 Вт/м<sup>2</sup> и обнаруживает зависимость

от частоты колебаний (высоты тона). Максимальное значение  $J_o$  приходится на 2 кГц.

Звукоизоляционная способность древесины  $R$  определяется простым соотношением

$$R = L_1 - L_2 , \quad (48)$$

где  $L_1$  и  $L_2$  – уровень силы звука соответственно до и после образца.

Обратная по смыслу величина называется коэффициентом звукопроницаемости  $\tau$  и определяется как

$$\tau = \frac{J_2}{J_1} ,$$

где  $J_1$ ,  $J_2$  – интенсивность звука до и после образца.

Силу звука, безразмерную величину для удобства обозначают в децибелах

$$L = 10 \lg \frac{J}{J_o} . \quad (49)$$

Звук условно делят на шум и музыкальный звук.

**Шум** обладает сплошным спектром, т.е. частоты содержащихся в них простых синусоидальных волн образует непрерывный ряд значений, целиком заполняющих некоторый интервал. Шум – это любой звук, который создаётся совокупностью несогласованных между собой источников. Всем хорошо знаком шум листвы деревьев, колыхимой ветром и т.д.

**Музыкальный звук** обладает линейным спектром частот: частоты, входящие в их состав синусоидальных волн образует ряд дискретных значений. Музыкальным звукам соответствуют периодические колебания. Каждая звуковая волна называется тоном. Высота тона зависит от частоты: чем выше частота, тем выше тон.

Если длину звуковой волны уменьшить кратно в 2...7 раз, то эти высокочастотные колебания называют обертонами. Эти колебания обертонов называют гармоническими колебаниями. Древесину по проводимости звука характеризуют звукопроводностью, звукоизолирующей и звукопоглощающей способностью, резонансными свойствами.

## 6.2. Скорость звука

Скорость распространения звука  $C$  определяется по времени распространения упругой волны по длине образца, м/с:

$$C = \frac{l}{\tau}, \quad (50)$$

где  $l$  – расстояние между датчиками, установленными по длине образца, м;

$\tau$  – время распространения упругой волны, с.

Скорость звука можно определить так, м/с:

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (51)$$

где  $E$  – динамический модуль упругости древесины, Н/м<sup>2</sup> = Па;

$\rho$  – плотность древесины, кг/м<sup>3</sup>.

Скорость звука можно определить так, м/с:

$$C = 2lf_o, \quad (52)$$

где  $l$  – длина образца (расстояние между датчиками), м;

$f_o$  – резонансная частота, Гц.

Значения скорости звука в древесине зависят от ее плотности, породы и направления относительно волокон (// – вдоль волокон;  $\perp$  – поперек волокон) (табл. 17).

Таблица 17

Модули упругости и скорости звука  
для некоторых пород древесины

Порода	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Модули упругости, МПа		$C_{//}$ , м/с	$C_{\perp}$ , м/с	Отношение $C_{//} / C_{\perp}$
		$E_{//}$	$E_{\perp}$			
Ель	0,47-483	11000	550	4790	1072	4,47
Сосна	0,52	12000	460	4760	932	5,11
Пихта	0,45	11000	490	4890	1033	4,73
Бук	0,73	16000	15000	4638	1420	3,27
Дуб	0,69	13000	10000	4304	1193	3,61

Скорость звука в сухой древесине значительно больше скорости звука в сырой древесине. С увеличением температуры древесины скорость звука убывает. В среднем скорость звука в древесине вдоль волокон составляет 5000 м/с.

Скорость распространения звука в материале называют **звукопроводностью древесины**. Звукопроводность древесины в продольном направлении в 16 раз, а в поперечном в 3...4 раза больше звукопроводности воздуха.

### 6.3. Звукоизолирующая способность древесины

Звукоизолирующая способность древесины характеризуется ослаблением прошедшего через древесину звука. Оценивается разницей звукового давления (в децибелах) до и после перегородки из древесины и по коэффициенту звукопроницаемости. Коэффициент звукопроницаемости показывает, во сколько раз уменьшается звук за перегородкой (табл. 17).

Способность древесины поглощать звук вызвана рассеянием звуковой энергии в структурных полостях и необратимыми тепловыми потерями вследствие внутреннего трения. Для оценки этой способности используют **коэффициент звукопоглощения**.

Звукопоглощение – способность материала ослаблять интенсивность звука. Звукопоглощающая способность материала характеризуется потерей звуковой энергии при падении звуковых волн, и их распространении в материальной среде.

Коэффициент звукопоглощения – отношение количества поглощенной ограждением звуковой энергии к энергии, падающей на него

$$\alpha = \frac{J_{\text{погл}}}{J_{\text{пад}}} = \frac{J_{\text{пад}} - J_{\text{отр}}}{J_{\text{пад}}}, \quad (53)$$

где  $J_{\text{пад}}$  – энергия звука, падающая на ограждение;

$J_{\text{отр}}$  – энергия отраженная;

$J_{\text{погл}}$  – энергия поглощенная.

Для сравнения можно указать, что коэффициент поглощения сосны примерно в 2...3 раза ниже, чем у мягкой ДВП.

Коэффициент звукопоглощения возрастает с увеличением пористости материала и зависит также от частоты звука: на частоте 2000 Гц коэффициент  $\alpha$  в 2,5 раза выше, чем на частоте 250 Гц.

Коэффициент звукопоглощения сосновой перегородки толщиной 19 мм в диапазоне частот 100-4000 Гц находится в пределах 0,081-0,110. По строительным нормам звукоизоляция стен должна быть не ниже 40 дБ, а межэтажных перекрытий – 48 дБ. Отсюда видно, что звукоизолирующая способность массивной древесины сравнительно невысока.

Таблица 18

Характеристики звукоизолирующей способности древесины

Порода	Толщина перегородки, см	Звукоизоляция, дБ	Коэффициент звукопроницаемости
Сосна	3	12	0,065
Дуб	4,5	27	0,002

## 6.4. Резонансная способность древесины

Это способность древесины резонировать, т.е. усиливать звук без искажения его высоты (тона). Эта способность древесины широко используется при строительстве акустических залов и изготовлении музыкальных инструментов, точнее основной их звукоизлучающей детали – деки. Хотя в природе немало других материалов, обладающих акустическими свойствами, даже превосходящими древесину по силе излучаемого звука, однако по нежности и тембровой окраске звучания, пока не найдено достойного заменителя древесины.

Энергия, передаваемая деке струной, расходуется на трение внутри деки и излучается в виде звуковой энергии в окружающее пространство. Известно, что в окружающий воздух передается только 3...5% энергии, передаваемой деке.

Дека – это деревянная деталь струнного инструмента, которая передает колебания от струн воздуху, делая звук намного громче, чем издает струна сама по себе. Дека работает по принципу вынужденных

колебаний. Она колеблется под влиянием струны, производя звук той же частоты, но с другим тембром.

Корпус гитары, например, состоит из верхней и нижней деки, которые соединены между собой обечайкой.

У пианино резонансная дека представляет собой щит толщиной 10 мм, склеенный из нескольких дощечек, выпиленных из древесины резонансной ели. На обратной стороне деки перпендикулярно волокнам древесины наклеены бруски из древесины ели, называемые рипками.

Гитарная дека имеет толщину 4...5 мм. Делают ее из дощечек толщиной 6 мм и шириной 60 мм радиальной распиловки древесины резонансной ели влажностью 8 %, без трещин и сучков с одинаковой шириной годовых колец. Дощечки склеивают по ширине казеиновым клеем или клеем ПВА. После склеивания щит калибруют, выравнивают по толщине, пропуская его через рейсмусовый станок.

Комплекс акустических свойств древесины, определяющих возможность ее использования в качестве материала для изготовления дек музыкальных инструментов, характеризуется скоростью звука, определяемой по формуле:

$$K = C = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (54)$$

где  $C$  – скорость звука в древесине, м/с;

$E$  – модуль упругости резонансной древесины, Па;

$\rho$  – плотность древесины, кг/м<sup>3</sup>.

Этот показатель характеризует главным образом способность материала к звуковому излучению, поэтому его называют константой излучения, или *акустической константой*  $K$ . Те породы древесины, для которых значения константы  $K$  максимальны, наилучшим образом подходят для изготовления музыкальных инструментов и для отделки акустических залов.

Наибольшей величиной акустической константы обладает древесина ели, пихты и кедра. Резонансные заготовки согласно ГОСТ 6900-83 должны изготавливаться из древесины с мелкими и равными

годовыми слоями, без сучков, крени, наклона волокон и других пороков древесины.

Наилучшими резонансными свойствами обладает древесина длительной (50 лет и более) выдержки.

Величины модуля упругости при растяжении и сжатии вдоль волокон, а также при статическом изгибе с нагружением в двух точках практически не различаются. Для древесины разных пород указанный модуль упругости чаще всего колеблется в пределах 10...15 тыс. МПа. Модуль упругости при растяжении и сжатии поперек волокон меньше, чем при растяжении и сжатии вдоль волокон, примерно в 25 раз у древесины хвойных пород (сосны, ели) и в 20 раз у лиственных пород (дуба, березы).

## **6.5. Выбор резонансной древесины**

Известно, что акустические свойства древесины зависят от породы древесины, условий произрастания, внутреннего строения и физических характеристик, а также времени заготовки, режима сушки, хранения и транспортировки.

Наилучшим материалом для изготовления дек, считается древесина березы и ели, а также клена, сосны, кедра сибирского и пихты кавказской. И все-таки, наиболее часто используют древесину ели, которая после усыхания улучшает свое звучание.

Резонансные деревья обычно произрастают в высоковозрастных насаждениях, возраст которых составляет более 150 лет. Они растут на северных склонах гор и каменистых почвах с низкой влажностью. В России для этой цели используется ель, отобранная преимущественно в Архангельской и Вологодской областях. Ель северных районов России обладает лучшими физико-механическими свойствами.

Резонансная ель имеет вертикальный ствол с зоной цилиндрической формы, лишенной сучков и заметных повреждений. Длина этой зоны составляет 5...6 метров. Крона дерева должна быть островершинной, узкой и симметричной.

Основным критерием при отборе резонансной древесины являются годовые кольца. Их оптимальная ширина равна от 1 до 4 мм. Древесина поздняя в составе годовых колец должна составлять 30%.



Древесина, имеющая широкие слои, придает звучанию музыкального инструмента приглушенность, а узкие – жесткость.

Волокна древесины ели на радиальном срезе должны быть прямыми с небольшим волнообразным сдвигом. Такая древесина является эластичной и дает чистые тона. Она представляет наибольшую ценность при изготовлении дек.

Качественную резонансную древесину можно определить по блеску. Ель, произрастающая на севере России, которая имеет шелковистый и нежный блеск, а также с хорошо проявляющимися тонкими слоями, придает звучанию серебристость и нежность.

В некоторых ситуациях в качестве диагностического показателя применяется запах древесины, по которому определяется ее смолистость. Установлено, что смолистые вещества оказывают негативное воздействие на такие свойства древесины, как акустические.

## **7. Оптические свойства древесины**

### **7.1. Свет и цвет**

Свет изучает наука «Оптика» – один из разделов физики. Согласно корпускулярной теории, свет – это поток частиц, называемых фотонами и квантами.

По другой, волновой теории, свет является совокупностью электромагнитных волн.

Свет обладает множеством характеристик. Одной из них является цвет. Электромагнитное излучение, воспринимаемое нашим глазом, различается по диапазону длин и частот волн. Например, фиолетовый цвет видится при длине волн 380...440 нм (нм – нанометр,  $10^{-9}$  м) и частоте 790...680 ТГц (ТГц – тераГц,  $10^{12}$  Гц), а желтый – при показателях 565–590 нм и 530–510 ТГц.

В качестве коротковолновой границы спектрального диапазона, занимаемого светом, принят участок с длинами волн в вакууме 380...400 нм (750...790 ТГц), а в качестве длинноволновой границы — участок 760...780 нм (385...395 ТГц).

Помимо цвета, свет обладает способностью перемещаться в пространстве, преломляться и отражаться. Преломление света представляет собой изменение направления электромагнитных волн. В нашей обыденной жизни такое явление встречается повсеместно. Например, если посмотреть на стакан чая, в котором находится ложка, можно заметить, что на границе воздуха и жидкости она будто «преломлена».

Аналогично привычным явлением для нас является отражение света, позволяющее увидеть себя в водной глади, зеркале или на блестящих предметах.

Скорость света рассчитывают в двух средах – в вакууме и прозрачной среде. В первом случае ее показатели неизменны. В космическом пространстве, например, скорость света постоянна и равна 299 792 458 м/с.

**Цвет** – качественная субъективная характеристика электромагнитного излучения. Она определяется на основании физиологического зрительного ощущения и зависит от ряда физических, физиологических и психологических факторов.

Цвет – это *ощущение*, которое получает человек при попадании ему в глаз световых лучей. Поток света с одним и тем же спектральным составом вызовет разные ощущения у разных людей в силу того, что у них различаются характеристики восприятия глаза, и для каждого из них цвет будет разным.

## 7.2. Декоративные свойства древесины

Декоративной считают древесину, имеющую красивый цвет, блеск и оригинальную текстуру.

Цветом называется зрительное ощущение человека отраженных лучей света [15]. Цвет вещества есть результат поглощения и отражения видимых лучей света.

Цвет материала обусловлен тем, что его молекулы поглощают только определенную часть падающих на них лучей света. Глаз человека различает лишь часть световых лучей, относящуюся к видимой области спектра (400...800 нм). Совместное действие световых лучей всего интервала видимой области на сетчатку глаза вызывает ощущение

ние белого цвета. Если из белого изъять какой-либо цвет спектра, то получим другой цвет. Например, если материал поглощает фиолетовые лучи (400...435 нм), глаз наблюдателя увидит зеленовато-желтый цвет. Объект, поглощающий желтые лучи, кажется синим.

Ниже приведены длины волн лучей и соответствующие им основные и дополнительные цвета. Если из белого цвета удалить основной, то получится дополнительный цвет.

Длина волны, мм	400 ... 435	435 ... 480	480 ... 490
Цвет основной	Фиолетовый	Синий	Зеленовато-синий
Цвет дополнительный	Зеленовато- желтый	Желтый	Оранжевый
Длина волны, мм	490 ... 500	500 ... 560	580 ... 595
Цвет основной	Синевато- Зеленый	Желтый	Зеленый
Цвет дополнительный	Красный	Пурпурный	Фиолетово-синий
Длина волны, мм	595 ... 605	605 ... 730	730 ... 760
Цвет основной	Оранжевый	Красный	Пурпурный
Цвет дополнительный	Синевато-зеленый	Синий	Зеленый

**Блеск древесины** – это способность направленно отражать световой поток. Отражающая способность поверхности тесно связана с величиной и характером неровностей.

По степени отражения различают поверхности глянцевые и матовые. Глянцевые поверхности в значительной степени отражают падающий на них световой поток. Матовые поверхности, имеющие однородные неровности, рассеивают отраженный световой поток равномерно во все стороны [15].

## Библиографический список

1. Леонтьев, Л.Л. Древесиноведение и лесное товароведение: Учебник/ Л.Л. Леонтьев. – СПб.: Издательство «Лань», 2017. – 416 с.
2. Потыкалова, М.В. Лесное товароведение с основами древесиноведения/ М.В. Потыкалова. – Архангельск: Арханг. гос. техн. ун-т, 2009.– 129 с.
3. Яворский, Б.М. Справочник по физике/Б.М. Яворский, А.А. Детлаф. – М.: Издат-во «Наука», 1974. – 942 с.
4. Чубинский, А.Н. Физика древесины. Учебное пособие по выполнению лабораторных работ / А.Н. Чубинский, Тамби А.А., Чубинский М.А., Чаузов К.В. – СПб.: СПбГЛТУ, 2015. – 67 с.
5. ГОСТ 16483.0–89 ДРЕВЕСИНА. Общие требования к физико-механическим испытаниям. – Введ. 1990-07-01.– М.: Издательство стандартов, 1989.– 28 с.
6. ГОСТ 16483.1–84 ДРЕВЕСИНА. Метод определения плотности. – Введ. 1985-07-01.– М.: Издательство стандартов, 1984. – 16 с.
7. ГОСТ 16483.3–84 ДРЕВЕСИНА. Методы определения предела прочности при статическом изгибе. – Введ. 1985-07-01. – М.: Издательство стандартов, 1984. – 17 с.
8. ГОСТ 16483.5–73\* ДРЕВЕСИНА. Методы определения предела прочности при скалывании вдоль волокон. – Введ. 1974-07-01. – М.: Издательство стандартов, 1999. – 19 с.
9. ГОСТ 16483.7–71 ДРЕВЕСИНА. Методы определения влажности. – Введ. 1973-01-01. – М.: Издательство стандартов, 1999. – 9 с.
10. ГОСТ 16483.10–73\* ДРЕВЕСИНА. Методы определения предела прочности при сжатии вдоль волокон. – Введ. 1974-07-01. – М.: Издательство стандартов, 1999. – 19 с.
11. ГОСТ 16483.18-72\*ДРЕВЕСИНА. Метод определения числа годичных слоев в 1 см и содержания поздней древесины в годичном слое. – Введ. 1984-07-01. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 9 с.

12. ГОСТ 25898-2012 Материалы и изделия строительные. Методы определения паропроницаемости и сопротивления паропроницанию. – М.: Издательство стандартов, 2012. – 22 с.

13. СП 131.13330.2012 Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99. Свод правил.

14. Крюк, В.И. Физика в древесиноведении и технологии древесины: Лекции/ В.И. Крюк, Е.Е. Швамм. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2007. - 80 с.

15. Жуков, Е.В. Технология защитно-декоративных покрытий древесины и древесных материалов: Учебник для вузов/ Е.В. Жуков, В.И. Онегин. – М.: Экология, 1993. –304 с.



## Оглавление

Введение .....	3
1 Строение древесины .....	4
1.1. Эволюционное развитие деревьев .....	4
1.2. Дерево .....	4
1.3. Строение древесины .....	7
1.4. Макроструктура древесины .....	9
1.5. Породы древесины .....	13
2. Механические свойства древесины .....	16
2.1. Характеристика механических свойств .....	16
2.2. Плотность древесины .....	17
2.2.1. Понятие плотности .....	17
2.2.2. Распределение плотности в стволе дерева ...	18
2.2.3. Определение плотности .....	19
2.3. Прочность и деформативность древесины .....	20
2.4. Прочность древесины на растяжение .....	22
2.5. Прочность древесины при сжатии .....	24
2.6. Прочность древесины при изгибе .....	26
2.7. Прочность древесины при скалывании .....	28
2.8. Прочность древесины при длительных нагрузках	31
2.9. Твердость древесины .....	31
2.10. Сила внешнего трения .....	34
2.10.1. Сила трения скольжения .....	34
2.10.2. Сила трения качения .....	35
2.11. Модуль упругости древесины .....	38
3. Влажность древесины .....	39
3.1. Понятие влажности .....	39
3.2. Гигроскопичность .....	40
3.3. Водопоглощение и разбухание древесины .....	43
3.3.1. Водопоглощение .....	43
3.3.2. Разбухание древесины .....	45

	3.3.3. Паропроницаемость древесины .....	46
	3.4. Деформативность древесины .....	50
4.	Тепловые свойства древесины .....	51
	4.1. Теплоемкость .....	51
	4.2. Теплопроводность .....	52
	4.3. Температуропроводность .....	54
	4.4. Тепловое расширение .....	55
	4.5. Термическое сопротивление древесины .....	56
5.	Электрические свойства древесины .....	58
	5.1. Электропроводность древесины .....	58
	5.2. Электрическая прочность древесины .....	59
	5.3. Диэлектрические свойства древесины. ....	60
	5.3.1. Диэлектрическая проницаемость .....	60
	5.3.2. Тангенс угла диэлектрических потерь .....	61
	5.3.3. Практическое применение .....	63
6.	Звуковые свойства древесины .....	65
	6.1. Звук .....	65
	6.2. Скорость звука .....	67
	6.3. Звукоизолирующая способность древесины .....	69
	6.4. Резонансная способность древесины .....	70
	6.5. Выбор резонансной древесины .....	72
7.	Оптические свойства древесины .....	73
	7.1. Свет и цвет .....	73
	7.2. Декоративные свойства древесины .....	74
	Библиографический список .....	75



Учебное издание

Иван Тихонович Глебов

Физика древесины

Учебное пособие